

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ИРРИГАЦИИ И
МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА»**

ВОХИДОВ АКМАЛ УЛАШЕВИЧ

**ЛУЧЕПОГЛОЩАЮЩИЕ ПАНЕЛИ
ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ
КОЛЛЕКТОРОВ И ИХ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Ташкент – 2024

УДК 696.4÷696.48-67

ББК 32.852.2

А- 27

А.У. Вохидов. Лучепоглощающие панели плоских солнечных водонагревательных коллекторов и их теплотехнические характеристики. Монография. – Т.: Издательство НИУ «ТИИИМСХ», 2024, 60 стр.

В монографии представлены научные результаты, полученные авторами в области солнечной энергетики, посвященные к изучению основного элемента плоского солнечного коллектора – лучепоглощающей панели и их теплотехнических характеристик. Подробно описаны конструктивные решения лучепоглощающих теплообменных панелей плоских солнечных водонагревательных коллекторов в солнечной системе горячего водоснабжения, и их основные теплотехнические параметры, а также влияние частичного поглощения и преобразования в тепло солнечного излучения на их коэффициент тепловых потерь и тепловую эффективность. Исследованы коэффициент теплопередачи от элементов листотрубных лучепоглощающих теплообменных панелей к теплоносителю в их теплоотводящих каналах, определены режим и характера течения теплоносителя во внутренних теплоотводящих каналах листотрубных лучепоглощающих теплообменных панелей плоских солнечных водонагревательных коллекторов, исследованы коэффициент конвективного внутреннего теплообмена теплоотводящих каналах плоских солнечных водонагревательных коллекторов, и приведены пути определения коэффициента конвективного теплообмена во внутренних теплоотводящих каналах листотрубных лучепоглощающих теплообменных панелей плоских солнечных водонагревательных коллекторов, и на этой основе разработана тепловая модель лучепоглощающей теплообменной панели плоских солнечных водонагревательных коллекторов для определения средней температуры внутренней поверхности стенки теплоотводящих каналов, предложены новые подходы по определению удельной теплопроизводительности плоских солнечных водонагревательных коллекторов.

Монография предназначена для научных работников и докторантов, специализирующихся в области использования солнечной энергетики, студентов и магистров соответствующих специальностей, а также для специалистов проектных организаций, инженеров по проектированию систем теплоснабжения и всем читателям, интересующимся солнечными коллекторами и системами теплоснабжения на их основе.

The monograph presents the scientific results obtained by the authors in the field of solar energy, devoted to the study of the main element of a flat-plate solar collector – a light-absorbing panel and their thermal characteristics. The design solutions of light-absorbing heat exchange panels of flat-plate solar water heating collectors in a solar hot water supply system are described in detail, and their main thermal engineering parameters, as well as the effect of partial absorption and conversion into heat of solar radiation on their heat loss coefficient and thermal efficiency. The coefficient of heat transfer from the elements of sheet-pipe light-absorbing heat exchange panels to the coolant in their heat transfer channels has been studied, the mode and nature of the heat transfer fluid flow in the internal heat transfer channels of sheet-tube light-absorbing heat exchange panels of flat-plate solar water heating collectors have been determined, the coefficient of convective internal heat transfer in the heat transfer channels of flat solar water heating collectors has been studied, and the ways of determining the coefficient of convective heat transfer in the internal heat-removing channels of sheet-tube ray-absorbing heat exchange panels of flat solar water heating collectors are given, and on this basis a thermal model of the ray-absorbing heat exchange panel of flat solar water heating collectors has been developed to determine the average temperature of the inner surface of the wall of heat-removing channels, new approaches have been proposed to determine the specific heat output of flat solar water heating collectors.

The monograph is intended for researchers and doctoral students, specializing in the use of solar energy, students and masters of relevant specialties, as well as for specialists of design organizations, engineers for designing heat supply systems and all readers interested in solar collectors and heat supply systems, based on them.

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор **Г.Н. Узаков**
PhD технических наук, доцент **Э.О. Бозоров**

ISBN 978-9910-8988-9-1

©Издательство НИУ «ТИИИМСХ», 2024

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	стр.
ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	8
ГЛАВА I. ЛУЧЕПОГЛОЩАЮЩИЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ ПАНЕЛИ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ.....	10
§1.1. Анализ конструктивных решений лучепоглощающих теплообменных панелей плоских солнечных водонагревательных коллекторов в солнечной системе горячего водоснабжения	10
§1.2. Основные теплотехнические параметры лучепоглощающих теплообменных панелей плоских солнечных водонагревательных коллекторов.....	17
§1.3. Влияние частичного поглощения и преобразования в тепло солнечного излучения, проходящего через светопрозрачные покрытия плоских солнечных коллекторов, на их коэффициент тепловых потерь и тепловую эффективность.....	19
Выводы по первой главе.....	26
ГЛАВА II. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛУЧЕПОГЛОЩАЮЩИХ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛЛЕК- ТОРОВ.....	28
§2.1. Коэффициент теплопередачи от элементов листотрубных лучепоглощающих теплообменных панелей к теплоносителю в их теплоотводящих каналах.....	28
§2.2. Определение режима и характера течения теплоносителя во внутренних теплоотводящих каналах листотрубных лучепоглощающих теплообменных панелей плоских солнечных водонагревательных коллекторов	32

§2.3. Коэффициент конвективного внутреннего теплообмена в теплоотводящих каналах плоских солнечных водонагревательных коллекторов.....	34
§2.4. Пути определения коэффициента конвективного теплообмена во внутренних теплоотводящих каналах листотрубных лучепоглощающих теплообменных панелей плоских солнечных водонагревательных коллекторов	36
§2.5. Тепловая модель лучепоглощающей теплообменной панели плоских солнечных водонагревательных коллекторов для определения средней температуры внутренней поверхности стенки теплоотводящих каналов	38
§2.6. Новый подход по определению удельной теплопроизводительности плоских солнечных водонагревательных коллекторов	44
Выводы по второй главе.....	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	50
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	51

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В данном списке приведены часто встречающиеся используемые в диссертации обозначения. Редко встречающиеся обозначения приведены в соответствующих главах диссертации.

T, t – температура, соответственно, K и $^{\circ}C$;

D – диаметр гидравлической трубы, m ;

$d_{вн}$ – внутренний диаметр коллекторной трубы, m ;

K – коэффициент теплопередачи, коэффициент тепловых потерь, $Вт/(м^2 \cdot ^{\circ}C)$;

F – площадь поверхности, $м^2$;

α – коэффициент теплообмена, $Вт/(м^2 \cdot ^{\circ}C)$; коэффициент поглощения СИ;

φ – географическая широта местности, *град*;

φ_0 – относительная влажность наружного воздуха, %;

q – поверхностная плотность потока тепла СИ, $Вт/м^2$;

Q – суммарная удельная теплопроизводительность коллектора за день $Дж/(м^2 \cdot \text{день})$, за месяц $Дж/(м^2 \cdot \text{мес})$; за год $Дж/(м^2 \cdot \text{год})$;

v – скорость ветра; линейная скорость теплоносителя, $м/с$;

η – тепловая эффективность;

τ – коэффициент пропускания СИ;

δ – толщина, $м$;

d – диаметр, $м$;

λ – коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot ^{\circ}C)$;

ν – коэффициент кинематической вязкости, $м^2/сек$;

a – коэффициент температуропроводности, $м^2/сек$;

ε – коэффициент излучения (степень черноты);

$a_{лп}$ – половина ширины лучепоглощающей панели, $м$;

G_f – массовый расход теплоносителя, $кг/час$;

m_f – удельный массовый расход теплоносителя, $кг/(м^2/°C)$;

ρ – плотность, $кг/м^3$; коэффициент отражения солнечного излучения;

β_c – коэффициент ослабления (экстинкции) солнечного излучения $м^{-1}$;

σ – постоянная Стефана-Больцмана, $Вт/(м^2 \cdot K^4)$;

n_c – коэффициент преломления СИ материала СП;

β – коэффициент объемного расширения, $°C^{-1}$.

Критерии:

$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$ – Нуссельта; $Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$ – Рейнольдса; $Gr = \frac{\beta g \Delta t d^3}{\nu^2}$ – Грасгоффа;

$Pr = \frac{\nu}{a}$ – Прандтля; $Ra = \frac{\beta g \Delta t \delta^3}{\nu a}$ – Рэлея;

Сокращения:

ВИЭ – возобновляемые источники энергии; ВИТ – внутренний источник тепла; ЗВП – замкнутая воздушная прослойка; ГВС – горячее водоснабжение; КПД – коэффициент полезного действия; ЛПТП – лучепоглощающая теплообменная панель; ЛПП – лучепоглощающая пластина; ЛПЭ – лучепоглощающий элемент; ОС – окружающая среда; ПСВК – плоский солнечный водонагревательный коллектор; ПСК – плоский солнечный коллектор; СГВС – система горячего водоснабжения; СИ – солнечное излучение; СП – светопрозрачное покрытие; СТС – система теплоснабжения; СЭ – солнечная энергия; ТН – теплоноситель; ТОК – теплоотводящий канал; ТЗ – тепловой зазор; ТЭР – топливно-энергетические ресурсы.

Индексы

верхние: Σ – суммарный; k – конвективный; l – лучистый; pr – прямое; $диф$ – диффузное; $эфф$ – эффективное; $дн$ – дневная; $мес$ – месячная; $год$ – годовая; $инд$ – истинный полдень;

нижние: *пр*– приведенный; *сп*– светопрозрачное покрытие; *о*– окружающая среда; *с*– стекло; *тп*– теплообменная панель; *эфф*– эффективная; *вп*– воздушная прослойка; *из*– тепловая изоляция; *дн*– дно; *бс* – боковая стенка; *фр*– фронтальная; *нар*– наружный; *вн*– внутренний; *лп*– лучепоглощающая пластина; *тз*– тепловой зазор; *ш*– стенка; *пад*– падающее; *погл*– поглощенное; *пн*– переплет; *пг*– пыль и грязь; *вх*– на входе; *вых*– на выходе; *f*– теплоноситель; *пол*– полезный; *тэ*– тепловая энергия; *тт*– традиционное топливо.

вторичные нижние индексы: *p-c*– между поверхностью ЛПТП и внутренней поверхностью СП; *c₂ - o* – между наружной поверхностью СП и окружающей средой; *p-o*– между поверхностью ЛПТП и окружающей средой; *p-f*– между ЛПТП и теплоносителем; *f-o*– между теплоносителем и окружающей средой.

ВВЕДЕНИЕ

В мире растет объем инвестиций в возобновляемые источники энергии, в частности в солнечную энергетику, и занимает одно из ведущих мест по масштабам их использования. Истощение традиционных ископаемых ресурсов в глобальном масштабе требует внедрения в практику устройств, работающих на солнечной энергии¹. В связи с этим, в системах горячего водоснабжения можно сэкономить до 60 % первичных энергоресурсов, затрачиваемых в таких системах за счет использования в них высокоэффективных солнечных технологий и этот показатель может быть дополнительно увеличен. В этой связи использование систем, основанных на высокоэффективных солнечных технологиях имеет политическое значение в мире с энергетической и экологической точек зрения, и их использование для решения проблем смягчения последствий изменения климата считается актуальным и востребованным.

В связи с этим общая установленная тепловая мощность плоских солнечных водонагревательных коллекторов, используемых в системах горячего водоснабжения, в 2024 году составил 560 ГВт (т.е. 800 млн м²) и годовой темп роста их использования в период 2014-2024 годов составил 13,45%². Одной из актуальных задач в этой области является получение максимальной тепловой энергии с поверхности установленной площади рассматриваемых коллекторов, моделирование многопараметрических тепловых процессов, протекающих в них, оптимизация характеристик рабочих режимов, совершенствование процедуры проведения тепловых и гидравлических испытаний, а также

¹Фортгов В.Е., Попель О.С. Энергетика в современном мире. - Долгопрудный: Интеллект, 2011. - 168 с.

² «Solar Heat Worldwide. Global Market Development and Trends in 2020. Detailed Market Figures 2019». IEA Solar Heating & Cooling Programme, May 2021.

повышение эффективности их использования в системах горячего водоснабжения.

Особое внимание уделяется проблемам использования солнечной энергии в качестве источников тепла в системах горячего водоснабжения жилых зданий, коммунально-бытовых и социальных объектов. В этом направлении принимаются комплексные меры по разработке и созданию новых, высокоэффективных конструкций плоских солнечных водонагревательных коллекторов и двухконтурных солнечных и солнечно-топливных систем на их основе. В реализации поставленных задач, в том числе в расширении использования высокоэффективных солнечных водонагревательных коллекторов в системах горячего водоснабжения, большое значение имеет обогащение внутреннего рынка качественными коллекторами с национальным сертификатом.

ГЛАВА I. ЛУЧЕПОГЛОЩАЮЩИЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ ПАНЕЛИ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

§1.1. Анализ конструктивных решений лучепоглощающих теплообменных панелей плоских солнечных водонагревательных коллекторов в солнечной системе горячего водоснабжения

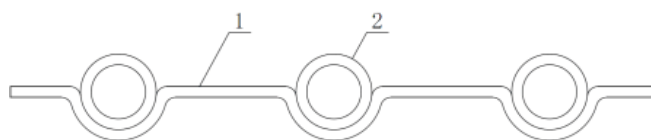
Основным элементом плоских солнечных водонагревательных коллекторов(ПСВК), в котором происходит поглощение, преобразование энергии солнечного излучения(СИ) в тепло и передача последнего к нагреваемой среде, является лучепоглощающая теплообменная панель(ЛПТП). Производимые сегодня ПСВК имеют существенные отличия в конструкции, технологии и материалах изготовления ЛПТП [1-3]. В связи этим, анализ конструктивных решений ЛПТП ПСВК является базисом при постановке вопроса по анализу основных конструктивных решений ПСВК.

Модель листотрубной конструкции ЛПТП впервые предложенная Б.В. Петуховым [4-5] занимает ведущие место с точки зрения технологии изготовления, надежности при эксплуатации и в массовом применении в течение 1940-1965 гг.

Классической вариант ЛПТП представляет собой зачерненную металлическую ЛПП с полуканавками, на которые уложены и закреплены с помощью пайки или хомутов ряд параллельных ТОК из круглых труб (рис.1.1), соединенных между собой общими подводющим и отводящим гидравлическими каналами, обеспечивающими равномерное распределение потока ТН по ТОК.

Как показывают результаты исследований [1], расчетное выражение, выведенное для определения коэффициента тепловой эффективности ЛПП рассматриваемого типа, применимо для большинства конструкций плоских ЛПП ПСВК.

За последние годы разработаны и все более широко применяются в странах Западной Европы конструкции листотрубных ЛПП из круглых и овальных алюминиевых труб с продольными плоскими ребрами, изготовленных методом экструзии (рис. 1.2а), которые имеют идеальные тепловые контакты между ЛПП и ТОК.



1 -ЛПП с полуканавками; 2 -ТОК

Рис. 1.1. Принципиальная схема поперечного сечения классического варианта листотрубной ЛПП ПСВК

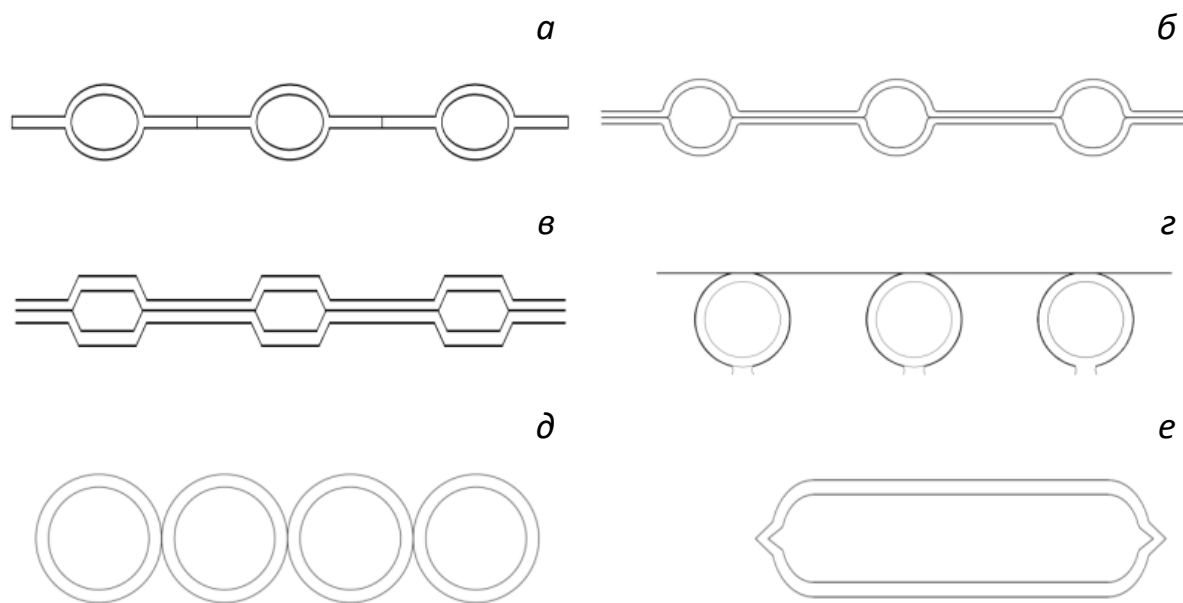
Листотрубные ЛПП для ПСВК с идеальными тепловыми контактами между ЛПП и ТОК могут быть изготовлены также методом штамповки из двух плоских металлических (стальных) листов с взаимно совпадающими гофрами для образования ТОК круглый или призматической форм (рис.1.2б), а также методом диффузионной сварки из двух алюминиевых листов (рис. 1.2в).

Листотрубные ЛПП для ПСВК рассматриваемого назначения могут быть изготовлены в разборном виде из двух материалов: ТОК из меди, нержавеющей стали или из теплостойкой пластиковой трубки, а ЛПП из листового алюминия или стали с элементами фиксации (рис.1.2г).

Тепловой контакт между ТОК и ЛПП может быть осуществлен за счет упругости элементов фиксации последней. Существенным недостатком ЛПП рассматриваемого типа является зависимость ее коэффициента тепловой эффективности ($\eta_{\text{ТП}}$) от проводимости ТЗ между внутренней поверхностью полуканавок ее ЛПП и наружной поверхностью ТОК. Согласно результатам исследования [6], простое крепление труб к листу с помощью проволоки или струбцин приводит к существенному снижению теплотехнических характеристик ПСК.

Проводимость ТЗ для обеспечения необходимого теплового контакта между данными элементами ЛПТП, по мнению авторов работы [6], должно быть не менее $33,3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$.

По мнению специалистов [7], среди этих ПСВК коллектор В.8203, благодаря высокой коррозионной стойкости ТОК его ЛПТП и малой стоимости, может найти широкое применение. Простота конструкции этого коллектора позволит наладить его производство частными предпринимателями в условиях небольших мастерских.



a - изготовленной методом экструзии; *б* и *в* - изготовленные методом штамповки из двух стальных листов и диффузионной сварки из двух алюминиевых листов с образованием ТОК призматической и круглой (овальной) форм; *г* – изготовленной в разборном виде из двух разнородных материалов; *д* – изготовленной из плотно уложенных друг с другом тепло-и атмосферостойких пластиков и резиновых труб; *е* – изготовленной из двух стальных листов, сваренных по периметру

Рис.1.2.Принципиальных схемы поперечных сечений ЛПТП ПСВК

Как показывают результаты расчетов по оптимизации давления сжатия в ТЗ между полуканавками ЛПП и ТОК разборных листотрубных ЛПТП ПСВК [8], значение фактического давления сжатия, создаваемого распирающими упругими стальными элементами фиксации ЛПП

коллектора В.8203 (толщиной 1мм) может достигать до 3 МПа, что в 3 раза превышает его необходимое значение.

В настоящее время серийное производства ПСВК с листотрубным ЛПТП для удовлетворения внутренней потребности Узбекистана налажено в производственных предприятиях ООО «MIR-SOLAR» марки SUV-10 и ПП ООО «ThermoWaterElectric» марки ROYAL. Годовая мощность данных предприятий по выпуску ПСВК составляет 10 000 м² и 150 000 м². Площадь поверхности производимых ПСВК составляет от 1,6 до 2,0 м². Масса единичного коллектора равна 50 и 34 кг, соответственно.

ЛПТП ПСВК образована из алюминиевых труб (с внутренним диаметром 13,5мм) с двумя продольными ребрами толщиной 1мм и шириной каждого 30мм, изготовленных методом экструзии (рис. 1.2а).

По простоте изготовления и массовости применения в ПСВК, после листотрубных, отличаются плоские лотковые проточные ЛПТП, представляющие собой плоский лоток, образованный из двух металлических или атмосферо- и теплостойких пластиковых листов, сваренных по периметру, образуя полости, т.е. плоского ТОК толщиной 10-15мм (рис. 1.2е). Согласно результатам исследований [9-10] благодаря относительно низкому значению средней рабочей температуры поверхности лотковых ЛПТП, по сравнению с листотрубными, теплопроизводительность ПСВК с плоским лотковым ЛПТП в теплое время года (май-сентябрь месяцы) при температуре получаемой горячей воды ($t_{ГВ}$) 50÷60°С в среднем на 30% выше, чем у ПСВК с листотрубными ЛПТП. В весенние и осенние месяцы года, благодаря сравнительно низкой тепловой инерционности (за счет меньшего количества воды в ТОК), теплопроизводительность ПСВК с листотрубной ЛПТП выше, чем у ПСВК с лотковой ЛПТП.

Единственным недостатком лотковых ЛПТП в ПСВК является их деформирование под воздействием статистического давления воды в них, т.е. малая механическая прочность по сравнению с листотрубными ЛПТП.

Анализ и обобщение мирового опыта в области солнечного коллекторостроения [11-12] показывает, что основными материалами для изготовления листотрубных ЛПТП для ПСВК у американских производителей являются медь (70%) и пластик (6%)- в основном для плоского солнечного абсорбера, а у европейских – медь (17%), нержавеющая сталь (23%), алюминий (30%), медь (для изготовления ТОК) + алюминий (для изготовления ЛПП) (16%). Толщина ЛПП медных ЛПТП ($\delta_{лп}$) в их абсолютном большинстве составляет 0,25мм при их ширине ($\alpha_{лп}$) 50-60мм. Площадь фронтальной поверхности ПСВК составляет от 1,5 до 3,0 м² (20%-1,5м²; 30%-2м² и 20%-3 м²), а значения отношения площади поверхности ЛПТП $F_{тп}$ к площади фронтальной поверхности корпуса коллектора $F_{фр}$ от 0,88 до 0,96 (40% - от 0,88 до 0,92 и 38% - от 0,92 до 0,96). Удельной внутренней объем ТОК ЛПТП для ТН составляет от 0,8 до 1,8 л/м² (40% - от 0,8 до 1,3 л/м² и 36% - от 1,3 до 1,8л/м²). Удельная (отнесенная к единице площади фронтальной поверхности) масса ПСВК (без теплоносителя в ТОК ЛПТП) составляет от 15 до 25 кг/м² у американских производителей и от 20 до 30 кг/м² у европейских производителей.

За последние годы за рубежом, особенно в Китае (70% мирового производства ПСВК), Австралии и Японии в широких масштабах производятся и экспортируются ПСВК с селективными покрытиями их ЛПП[13]. Технология создания ПСВК начата в ФТИ АН РУз и одновременно в НПО «Квант» в 1975÷1978гг., и под руководством проф.

Р.Р. Авезова разработаны несколько поколений ПСВК, которые были внедрены в производственный процесс [14-15].

Как видно из табл. 1.1 за счет конструкций ЛПТП, где вместо гладких ТОК в ЛПТП будут применяться ТОК с развитыми теплообменными внутренними поверхностями, с использованием витых ТОК или накатанных турбулизирующих теплоотводящих трубок, можно добиться высоких показателей теплосъема из ПСВК, а использование селективных покрытий ЛПТП обеспечивает высокую эффективность ПСВК с повышением их КПД до 10-12% [105].

Таблица 1.1.

Сравнительная оценка конструкций ЛПТП

№	Наименование панели (вид панели)	Металло-емкость ЛПТП на 1 м ² (кг)	ТОК	Материал изготовленной панели
1.	ЛПТП из зачерненной металлической пластины с полуканавками [21]	более 7,0	гладкий	Нержавеющая сталь
2.	ЛПТПцельно изготовленная из коррозионностойкого алюминиевого сплава[21]	3,5-4,5	гладкий	Алюминий
3.	ЛПТП с замковыми элементами цельно изготовленная из алюминия по технологии – литье под давлением[106]	3,5-4,5	гладкий	Алюминий
4.	ЛПТПцельно изготовленная с утолщением к трубке из алюминия по технологии – литье под давлением [107]	3,5-4,5	гладкий	Алюминий
5.	ЛПТПцельно изготовленная из алюминия по технологии – литье под давлением [108]	до 3,5	гладкий	Алюминий
6.	Модернизированная теплоприемная панель с замковыми элементами цельно изготовленная из алюминиевого профиля методом экструзии [109]	3,5-4,5	гладкий	Алюминий
7.	ЛПТПс витым теплоотводящим каналом [110]	до 3,5	Развитой	Панель –алюминиевая Трубка -медная
8.	ЛПТПс накатанным теплоотводящим каналом в виде колец [111]	до 3,5	Развитой	Панель –алюминиевая Трубка -медная

Согласно результатам исследований [14, 16] при коэффициентах поглощения ($\alpha_s = 0,9$) и излучения ($\varepsilon_c = 0,09$), уровне вакуума $P \leq 0,07$ Па и поверхностной плотности суммарного СИ, падающего на их фронтальную поверхность $q_{\text{падс}}^{\Sigma} = 900 \text{ Вт/м}^2$, равновесная температура

на поверхности ЛПЭ без концентрации СИ может достигать 200°C . В случае применения параболоцилиндрического концентратора СИ равновесная температура поверхности ЛПЭ поднимается до 400°C , а затем падает до 260°C , что объясняется ухудшением вакуума и оптических свойств селективного лучепоглощающего покрытия при температурах $380\div 400^{\circ}\text{C}$.

Солнечные водонагревательные установки на базе ПСВК, как правило, собираются из трубчатых элементов. Существует несколько вариантов отвода полезной энергии из ПСВК в зависимости от их конструктивного исполнения, т.е. в зависимости от материала изготовления их ЛПЭ [14, 16]. Одним из простейших способов отвода полезной энергии из ПСВК является отвод тепла вынужденным потоком ТН, непосредственно омывающим внутреннюю поверхность стенки ЛПЭ. Существенным недостатком ПСВК рассматриваемого типа является возможность утечки ТН из ПСВК при повреждении или разрушении хотя бы одного из трубчатых элементов. Это обстоятельство значительно усложняет эксплуатацию солнечных водонагревательных установок, особенно при использовании тепловых труб для отвода тепла из ПСВК.

Следует отметить, что для широкомасштабного внедрения солнечных установок, в частности ПСВК в СГВС, немаловажным является разработка государственных и национальных нормативных документов (стандартов), технических регламентов, рекомендаций по созданию и сбору энергоустановок, по их внедрению и эксплуатации в СГВС объектов жилого, коммунально-бытового и административного назначения.

До сегодняшнего дня в агентстве «Узстандарт» были зарегистрированы и внедрены более 20 Государственных стандартов в

области солнечной энергетики, в частности, 8 Государственных стандартов в области солнечного ГВС с использованием ПСВК [112].

Группой научных сотрудников во главе с проф. Р.Р. Авезовым был разработан ряд государственных стандартов и строительных норм и правил по эксплуатации установок на основе солнечной энергии [113, 115, 116], которые способствуют созданию условий для широкого использования ПСВК при разработке, сборке, их транспортировке и эксплуатации в СГВС. В целом разработка вышеперечисленных стандартов направлена на дальнейшее развитие и совершенствование положений нормативной документации в области стандартизации, сертификации и аккредитации солнечных энергоустановок в стране.

Введение в действие государственных стандартов Республики Узбекистан будет способствовать широкомасштабному развитию в стране СЭ, созданию сертификационных лабораторий, в соответствии с требованиями международных и государственных стандартов, обеспечивая, в первую очередь, комплектность по технической документации, проведению испытаний всей системы в целом, соблюдая все меры предосторожности.

§1.2. Теплотехнические параметры лучепоглощающих теплообменных панелей плоских солнечных водонагревательных коллекторов

Основными теплотехническими параметрами ЛТП ПСВК, показывающими степень их энергетического совершенства и влияющими на их теплопроизводительность и тепловую эффективность, являются:

– приведенный к единице площади фронтальной поверхности корпуса ($F_{\text{фр}}$) рассматриваемого ПСВК и разности средней рабочей

температуры поверхности ЛПТП (\bar{t}_p) и температуры ОС (t_o) суммарный коэффициент тепловых потерь (далее приведенный коэффициент тепловых потерь) ЛПТП в ОС ($K_{прp-o}$);

– коэффициент тепловой эффективности ЛПТП, характеризующий эффективность переноса тепла от элементов рассматриваемой ЛПТП к ТН, циркулирующему в ее ТОК ($\eta_{ТП}$);

– приведенная к единице площади фронтальной поверхности корпуса ПСВК эффективная поглотательная способность суммарного СИ (далее эффективная приведенная поглотательная способность), характеризующая оптическую эффективность системы «ЛПТП-СП» рассматриваемого ПСВК (η_o), которая определяется произведением эффективной интегральной поглотательной способности суммарного СИ поверхности ЛПТП ($\alpha_{p_{эфф}}$) на приведенную к единице площади фронтальной поверхности корпуса ПСВК эффективной пропускательной способности суммарного СИ СП корпуса коллектора ($\tau_{сп_{эфф}}$), т.е.
$$\eta_o = (\alpha_p \tau_{сп})_{эфф};$$

– приведенная к единице площади фронтальной поверхности корпуса суммарная теплоемкость (далее приведенная теплоемкость) элементов ПСВК ($C_{пр}$), характеризующая тепловую инерционность данного коллектора;

– коэффициент заполнения ПСВК ($K_{зап}$), представляющий собой отношение площади зачерненной поверхности ЛПТП ($F_{ТП}$) к площади фронтальной поверхности коллектора ($F_{фр}$).

Кроме перечисленных основных теплотехнических параметров ПСВК существует ряд их производных параметров (комплексов), значения которых могут быть определены через значения их основных

теплотехнических параметров в различных комбинациях, например, такие как, $\eta_{\text{ТП}} K_{\text{прр-о}}$, $\eta_{\text{ТП}} (\alpha_p \tau_{\text{сп}})_{\text{эфф}}$, $\frac{C_{\text{пр}}}{K_{\text{прр-о}}}$ и другие.

В последующих главах будет рассмотрен ряд ключевых теплотехнических параметров, влияющих на производительность ЛПП ПСВК.

1.3. Влияние частичного поглощения и преобразования в тепло солнечного излучения, проходящего через светопрозрачные покрытия плоских солнечных коллекторов, на их коэффициент тепловых потерь и тепловую эффективность

Основными компонентами ВИЭ в Узбекистане являются солнечная, гидравлическая, ветровая и геотермальная энергия, а также энергии биомассы. Согласно результатам проведенных оценок, технический потенциал ВИЭ в республике составляет 270 млн. т.у.т., что более чем в три раза превышает ежегодную потребность страны в энергоресурсах [А4; стр. 114-116].

В связи тем, что 98,6 % энергетического потенциала ВИЭ вместе взятых, приходится на долю СЭ, последняя считается основным определяющим фактором при планировании доли ВИЭ в энергобалансе страны [17; стр. 10-17].

Одной из наиболее подготовленных сфер широкомасштабного использования СЭ в отраслях экономики республики, как и во всем мире, считается преобразование ее с помощью ПСВК в низкопотенциальное тепло и использование последнего в качестве источника тепла в СГВС жилых, коммунально-бытовых и социальных объектов, являющихся основными потребителями такого же температурного потенциала [24].

Отметим, что для покрытия тепловых нужд населения Узбекистана только на ГВС ежегодно требуется 222,42 млн. ГДж тепловой энергии. При КПД топливных котлов 0,8 и теплотворной способности условного топлива 29,31 Мдж/кг.у.т., для выработки 222,42 млн. ГДж, тепловой энергии требуется сжигание условного топлива в количестве 9,5 млн. т.у.т./год, что составляет 12% ежегодно вырабатываемых в республике первичных ТЭР (примерно 80 млн. т.у.т.).

Как показывают результаты обобщения опыта эксплуатации солнечных СГВС в Узбекистане, около 60% годовой потребности на ГВС может быть покрыто за счет использования СЭ. Следовательно, за счет использования СЭ в СГВС ежегодная экономия углеводородного топлива может составить около 5,7млн. т.у.т.[17].

СГВС, основанные на использовании энергии СИ в качестве источника тепла, принято называть солнечными.

Основным элементом солнечных СГВС является ПСВК (рис.1.3), в котором происходит улавливание, поглощение и преобразование СЭ в тепло и передача последнего к нагреваемой среде.

Традиционный ПСВК состоит из плоской ЛПТП со встроенными ТОК для ТН (воды), уложенной в плоский ящик (корпус) с теплоизолированным дном и боковыми стенками, защищенный сверху СП [18-21].

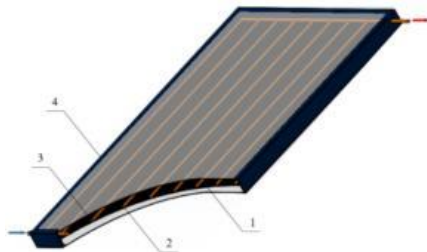


Рис.1.3. Плоский солнечный водонагревательный коллектор:

1-ЛПТП; 2- ТОК;3-СП; 4-корпус.

СП корпуса коллектора, пропуская через себя коротковолновое СИ, практически не пропускает обратно длинноволновое излучение зачерненной (фронтальной) поверхности ЛПТП и, тем самым создает парниковый эффект. Наряду с этим, СП корпуса ПСВК уменьшает кондуктивно- конвективные тепловые потери от фронтальной поверхности их ЛПТП в ОС.

Выражение для тепловой эффективности СП ПСВК, полученное на основе реализации его тепловой модели, имеет вид [1]:

$$\eta_{\text{СП}} = \tau_{\text{СП}}^{\text{эфф}} - K_{\text{СПр-0}}^{\text{эфф}} \frac{\bar{t}_p - t_0}{q_{\text{пад}}}, \quad (1.1)$$

где $\tau_{\text{СП}}^{\text{эфф}}$ – эффективный коэффициент пропускания СИ материала СП, в котором учтено многократное внутреннее отражение проходящего СИ между границами раздела СП; $K_{\text{СПр-0}}^{\text{эфф}}$ - эффективный коэффициент тепловых потерь фронтальной поверхности ЛПТП через СП, в котором учтено частичное поглощение и преобразование в тепло СИ, проходящего через СП; \bar{t}_p и t_0 - соответственно, средняя (по поверхности) рабочая температура фронтальной поверхности ЛПТП и температура ОС; $q_{\text{пад}}$ - поверхностная плотность потока СИ, падающего на плоскость фронтальной поверхности СП корпуса ПСВК.

Значение $\tau_{\text{СП}}^{\text{эфф}}$ в (1.1) определяется из отношения

$$\tau_{\text{СП}}^{\text{эфф}} = \frac{(1-\rho)^2(1-\alpha_{\text{СП}})}{1-\rho_{\text{СП}}^2(1-\alpha_{\text{СП}})^2}, \quad (1.2)$$

где

$$\rho_{\text{СП}} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(r-1)}{\sin^2(r+1)} + \frac{tg^2(r-1)}{tg^2(r+1)} \right] \quad (1.3)$$

- коэффициент отражения СИ фронтальной поверхности СП; i - угол падения СИ на фронтальную поверхность СП;

$$r = \arcsin \left(\frac{\sin i}{n_{\text{СП}}} \right) \quad (1.4)$$

- угол преломления СИ материала СП; $n_{сп}$ - показатель преломления СИ материалы СП.

Значение коэффициента поглощения СИ материала СП $\alpha_{сп}$ в (1.2) определяется из выражения [21]:

$$\alpha_{сп} = 1 - \frac{\cos r}{(\beta\delta)_{сп}} \left[1 - e^{-\frac{(\beta\delta)_{сп}}{\cos r}} \right], \quad (1.5)$$

полученного на основе интегрирования экспоненциального распределения мощности поглощенного СИ по толщине рассматриваемого СП ($\delta_{сп}$). В (1.5) $\beta_{сп}$ коэффициент экстинкции (ослабления) проходящего СИ материала СП.

Отметим, что значение $\alpha_{сп}$, определенное по (1.6), при прочих равных условиях (имеются в виду $\beta_{сп}$, $\delta_{сп}$ и r) почти в два раза меньше, чем его значение, определенное из общеизвестного выражения [22-23]:

$$\alpha_{сп} = 1 - e^{-\frac{(\beta\delta)_{сп}}{\cos r}}, \quad (1.6)$$

характерного для случая равномерного распределения мощности, поглощенного СИ по толщине СП.

Для определения значения $K_{спр-0}^{эфф}$ рекомендуется использование выражения

$$K_{спр-0}^{эфф} = K_{спр-0}^{\beta=0} - \Delta K_{спр-0}, \quad (1.7)$$

в котором

$$K_{спр-0}^{\beta=0} = \left(\frac{1}{\alpha_{впр-с1}^к + \alpha_{впр-с1}^л} + \frac{\delta_{сп}}{\lambda_{сп}} + \frac{1}{\alpha_{нарс2-0}^к + \alpha_{нарс2-0}^л} \right) \quad (1.8)$$

- коэффициент тепловых потерь фронтальной поверхности ЛПТП через СП ПСВК при отсутствии в СП ВИТ, который формируется в нем в результате частичного поглощения и преобразования в тепло проходящего через него СИ (т.е. при $\beta_{сп} = 0$); $\Delta K_{спр-0}$ - уменьшение коэффициента тепловых потерь ЛПТП через СП корпуса вследствие частичного поглощения и преобразования в тепло проходящего СИ.

В выражении (1.8) $\alpha_{\text{ВП}p-c_1}^k$ и $\alpha_{\text{ВП}p-c_1}^l$ – соответственно, коэффициенты конвективного (к) и лучистого (л) теплообмена в ЗВП, заключенной между фронтальной поверхностью ЛПТП (р) и внутренней поверхностью СП (c_1); $\lambda_{\text{СП}}$ - коэффициент теплопроводности материала СП; $\alpha_{\text{НАР}c_2-0}^k$ и $\alpha_{\text{НАР}c_2-0}^l$ - соответственно, коэффициенты конвективного (к) и лучистого (л) теплообмена между наружной поверхностью СП (c_2) и ОС (о).

Выражение (1.8) получено на основе решения одномерного дифференциального уравнения стационарной теплопроводности второго порядка для СП при отсутствии в нем ВИТ [19]:

$$\frac{dx}{dx^2} = 0 \quad (1.9)$$

при граничных условиях первого рода, т.е.

$$\left. \begin{aligned} t_x &= t_{c_1} & \text{при } x &= 0 \\ t_x &= t_{c_2} & \text{при } x &= \delta_{\text{СП}} \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

с учетом равенств тепловых потоков, подводимых на внутреннюю поверхность СП со стороны фронтальной поверхности ЛПТП

$$q_{\text{ВП}p-c_1}^{\Sigma} = (\alpha_{\text{НАР}c_2-0}^k + \alpha_{\text{НАР}c_2-0}^l)(t_p - t_{c_1}), \quad (1.11)$$

отводимых от наружной поверхности СП в ОС

$$q_{\text{НАР}c_2-0}^{\Sigma} = (\alpha_{\text{НАР}c_2-0}^k + \alpha_{\text{НАР}c_2-0}^l)(t_{c_2} - t_0) \quad (1.12)$$

и передаваемых от внутренней поверхности СП к его наружной поверхности путем теплопроводности

$$q_{\text{ТП}c_1-c_2} = \frac{\delta_{\text{СП}}}{\lambda_{\text{СП}}}(t_{c_1} - t_{c_2}), \quad (1.13)$$

т.е.

$$q_{\text{ВП}p-c_1}^{\Sigma} = q_{\text{ТП}c_1-c_2} = q_{\text{НАР}c_2-0}^{\Sigma} \quad (1.14)$$

При граничных условиях (1.10) и выражениях (1.11), (1.12) и (1.13) t_{c_1} и t_{c_2} – соответственно, температуры внутренней и наружной поверхности СП.

Для определения значения $\Delta K_{\text{СП-0}}$ нами на основе решения одномерного дифференциального уравнения стационарной теплопроводности второго порядка для СП при наличии в нем ВИТ, т.е.

$$\frac{d^2tx}{dx^2} + q_v(x) = 0, \quad (1.15)$$

получено аналитическое выражение

$$\Delta K_{\text{СП-0}} = K_{\text{СП-0}}^{\beta=0} - K_{\text{СП-0}}^{\beta>0} = \left\{ \begin{array}{l} 0,5(A_1 + A_2 + B_1 + B_2 + C_1 + C_2) - \frac{\cos^2 r_{\text{пр}}}{(\beta\delta)_c^2} (A_1 - A_2) \cdot \\ \cdot \left(1 - e^{-\frac{(\beta\delta)_c}{\cos r}} \right) - \frac{\cos^2 r_{\text{диф}}^{\text{ЭК}}}{(\beta\delta)_c^2} [(B_1 + C_2) - (B_2 + C_1)] \left(1 - e^{-\frac{(\beta\delta)_c}{\cos r_{\text{диф}}^{\text{ЭК}}}} \right) + \\ + \frac{\cos r_{\text{пр}}}{(\beta\delta)_c} \left[A_1 e^{-\frac{(\beta\delta)_c}{\cos r}} - A_2 \right] + \frac{\cos^2 r_{\text{диф}}^{\text{ЭК}}}{(\beta\delta)_c^2} (B_1 + C_2) \frac{\cos^2 r_{\text{диф}}^{\text{ЭК}}}{(\beta\delta)_c^2} - (B_2 + C_1) \end{array} \right\} (\bar{t}_p - t_0)^{-1}, \quad (1.16)$$

в котором учтено экспоненциальное распределение мощности поглощенного в СП проходящего СИ по его толщине.

В уравнении (1.15)

$$q_v(x) = \frac{\sum q_{\text{погл}_c(x)}}{\delta_c} = \frac{1}{\delta_c} \left[\begin{array}{l} A_1 \left(1 - e^{-\frac{[\beta(\delta-x)]_c}{\cos r_{\text{пр}}}} \right) + A_2 \left(1 - e^{-\frac{(\beta x)_c}{\cos r_{\text{пр}}}} \right) + \\ + (B_1 + C_2) \left(1 - e^{-\frac{[\beta(\delta-x)]_c}{\cos r_{\text{диф}}^{\text{ЭК}}}} \right) + (B_2 + C_1) \left(1 - e^{-\frac{(\beta x)_c}{\cos r_{\text{диф}}^{\text{ЭК}}}} \right) \end{array} \right], \quad (1.17)$$

- отнесенная к единице объема СП суммарная мощность ВИТ [24-25].

В решении (1.16) и выражении (1.17) A_1 и B_1 - соответственно, поверхностные плотности потоков прямого и диффузного СИ, прошедших через верхнюю границу раздела СП; A_2 и B_2 – соответственно, поверхностные плотности потоков прямого и диффузного СИ, отраженных от нижней границы раздела СП; C_1 и C_2 – соответственно, поверхностные плотности потоков суммарного СИ, прошедшего через нижнюю границу раздела СП и отраженных от его верхней границы раздела поверхностные плотности потоков диффузного СИ, которые отражены от зачерненной фронтальной поверхности ЛПТП, учитывающие продолжения многократных внутренних отражений СИ между границами разделов СП и ЗВП между корпуса ПСВК.

Согласно результатам соответствующих расчетов при $q_{\text{пад}}^{\text{пр}} = 700 \text{ Вт/м}^2$, $q_{\text{пад}}^{\text{диф}} = 70 \text{ Вт/м}^2$, $\beta_{\text{сп}} = 20 \text{ л/м}$; $\delta_{\text{сп}} = 0,007 \text{ м}$; $\bar{t}_p = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_0 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ значение $\Delta K_{\text{спр-0}}(\bar{t}_p - t_0)$ составляет $25,361 \text{ Вт/м}^2$, а $\Delta K_{\text{спр-0}} - 0,8454 \text{ Вт/(м}^2\text{ }^\circ\text{C)}$.

При значениях $K_{\text{спр-0}}^{\beta=0} = 6,42 \text{ Вт/(м}^2\text{ }^\circ\text{C)}$ (для ПСВК с обычным черным покрытием на поверхности ЛПТП) и $3,83 \text{ Вт/(м}^2\text{ }^\circ\text{C)}$ (для ПСВК с селективным покрытием на поверхности ЛПТП), которые определены при одинаковых внешних условиях, уменьшение $K_{\text{спр-0}}^{\text{эфф}}$ составляет $15,5 \%$ для коллектора с обычным черным покрытием на поверхности ЛПТП и $28,4 \%$ для коллектора с селективным покрытием на поверхности ЛПТП.

Резюмируя результаты научных исследований по проведенному анализу конструктивных решений листотрубных ЛПП ПСВК и определению их основных теплотехнических характеристик, можно констатировать, что несмотря на отдельные недостатки, полученные результаты представляют значительный интерес в расширении масштабов их практического применения. Без подробного ознакомления с результатами этих исследований и их анализа, вряд ли можно было ставить и решить задачи, поставленные в данной диссертации, главными из которых являются:

1. Установление расчетным и экспериментальным путем выражения по определению коэффициента конвективного теплообмена во внутренних ТОК ЛПП ПСВК.
2. Исследование и поиск путей интенсификации процессов конвективного теплообмена во внутренних ТОК ЛПП ПСВК без существенного роста их гидравлического сопротивления;

3. Исследование закономерностей формирования коэффициента теплопередачи от элементов ЛПП ПСВК к ТН, циркулирующему в ее внутренних ТОК и установление расчетного выражения для определения его значения;
4. Исследование теплогидравлических процессов, происходящих в теплоотводящих каналах лучепоглощающих теплообменных панелей плоских солнечных водонагревательных коллекторов, используемых в системах теплоснабжения с учетом климатических условий Республики Узбекистан;
5. Разработка научно обоснованных рекомендаций по повышению тепловой эффективности ПСВК в СГВС.

Выводы по первой главе

На основании проведенного сравнительного анализа основных конструктивных решений и технологий разработки ЛПП ПСВК для СГВС, существующих тепловых моделей по определению их теплопроизводительности, методов их теплового тестирования и исследований по тепловой оптимизации их основных конструктивных, теплотехнических и режимных параметров с точки зрения использования их в СГВС, можно заключить следующее:

1. Проведен анализ конструктивных решений ЛПП - основного элемента ПСВК, который имеет отличие в их конструкциях, технологии и материалам изготовления.

2. Выявлено, что развитие отрасли солнечной тепловой энергетики тесно связано с разработкой и принятием соответствующих нормативно-правовых документов, адаптированных к климатическим условиям Республики Узбекистан. Изучив многолетний опыт зарубежных и отечественных специалистов в области солнечной энергетики были разработаны национальные и государственные стандарты в данной

области, которые способствуют устойчивому развитию и эффективному применению предлагаемых солнечных СГВС в различных отраслях экономики.

3. Приведены основные теплотехнические параметры ЛПТП ПСВК, показывающие степень их энергетического совершенства и влияющие на их теплопроизводительность и тепловую эффективность при использовании их в солнечных СГВС.

4. На основе изучения основных теплотехнических параметров ЛПТП ПСВК исследовано влияние частичного поглощения и преобразования в тепло СИ, проходящего через СП ПСВК, на коэффициентах тепловых потерь и тепловую эффективность.

ГЛАВА II. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛУЧЕПОГЛОЩАЮЩИХ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

§2.1. Коэффициент теплопередачи от элементов листотрубных лучепоглощающих теплообменных панелей к теплоносителю в их теплоотводящих каналах

ПСВК является основным элементом солнечных СГВС. В отличие от обычных водо-водяных теплообменников СГВС, в которых происходит интенсивная передача тепла от одной жидкости к другой, а излучение несущественно, в ПСВК осуществляется перенос энергии к ТН (нагреваемой воде) от удаленного источника лучистой энергии, т.е. от Солнца[А7; стр. 168-172].

Основным элементом ПСВК, в котором происходит поглощение и преобразование в тепло и передача последнего к ТН, является ЛПТП. Существующие в мировом производстве и применении ПСВК в основном отличаются по конструкции, технологии и материалам изготовления их ЛПТП, как было отмечено выше.

В производстве ПСВК по технологичности изготовления, надежности в эксплуатации и массовости применения ведущее место занимает листотрубная конструкция ЛПТП.

Она представляет собой зачерненную металлическую ЛПП с полуканавками, на которые уложены и закреплены параллельные ТОК из круглых труб, соединенных между собой общими подводным и отводящим гидравлическими каналами, обеспечивающими равномерное распределение потока теплоносителя по ТОК.

Основными теплотехническими параметрами ПСВК, показывающими степень их энергетического совершенства и влияющими на теплопроизводительность и тепловую эффективность, являются:

-приведенный к единице площади фронтальной поверхности корпуса рассматриваемого коллектора ($F_{фр}$) и отнесенный к единице разности разности средней рабочей температуры (\bar{t}_p) и температуры окружающей среды (t_o) суммарный коэффициент тепловых потерь ЛПТП в окружающую среду ($K_{прp-o}$);

-коэффициент тепловой эффективности ЛПТП, характеризующий эффективность переноса тепла от элементов рассматриваемой ЛПТП к воде циркулирующей в ее ТОК ($\eta_{ТП}$).

Выражение для определения коэффициента тепловой эффективности разборных листотрубных ЛПТП Петухова Б.В. [4; с.6-8, 5; с.197], в которых ряд параллельных ТОК круглой формы уложены на полуканавки ЛПП и закреплены между собой с помощью струбцин, хомутов или пайки, имеет вид:

$$\eta_{ТП} = \left[\frac{2a_{лн} + d_{нар}}{2a_{лн} \eta_{лн} + d_{нар}} + K_{прp-o} \left(\frac{\delta_{мз}}{\lambda_{мз} p_{мз}} + \frac{\delta_w}{\lambda_w p_{wcp}} + \frac{1}{\bar{\alpha}_{квн} p_{wвн}} \right) \right]^{-1}, \quad (2.1)$$

где $2a_{лн}$ - межтрубное расстояние ЛПП ($a_{лн}$ - ширина ЛПП, т.е. ребра листотрубных ЛПТП); $d_{нар}$ - наружный диаметр ТОК; $K_{прp-o}$ - приведенный к единице площади фронтальной поверхности корпуса ПСВК ($F_{фр}$) суммарный коэффициент тепловых потерь ЛПТП в окружающую среду; $\lambda_{мз}$ и $\delta_{мз}$ -соответственно, коэффициент теплопроводности и толщина ТЗ между внутренней поверхностью полуканавки ЛПП и наружной поверхностью ТОК ЛПТП; δ_w и λ_w - соответственно, толщина стенки и коэффициент теплопроводности материала изготовления ТОК; $\bar{\alpha}_{квн}$ -

средний по длине канала коэффициент конвективной теплоотдачи внутренней поверхности стенки ТОК;

$$\eta_m = \frac{th(a_m \sqrt{\frac{K_{np-p-o}}{\delta_m \lambda_m}})}{a_m \sqrt{\frac{K_{np-p-o}}{\delta_m \lambda_m}}} \quad (2.2)$$

- коэффициент тепловой эффективности ЛПП; δ_m и λ_m - соответственно, толщина и коэффициент теплопроводности материала изготовления ЛПП;

$$p_{mз} = 0.5\pi d_{mз} \quad (2.3)$$

- периметр ТЗ между внутренней поверхностью полуканавки и наружной поверхностью стенки ТОК ($d_{mз}$ - диаметр рассматриваемого ТЗ);

$$p_{wcp} = \frac{2\pi\delta_w}{\ln \frac{d_{нар}}{d_{вн}}} \quad (2.4)$$

-периметр среднего поперечного сечения стенки единичного ТОК цилиндрической формы;

$$p_{wвн} = \pi d_{вн} \quad (2.5)$$

-периметр поперечного сечения внутренней поверхности единичного ТОК цилиндрической формы ($d_{вн}$ - внутренний диаметр единичного ТОК цилиндрической формы).

Как следует из анализа выражения (2.1), при прочих равных условиях (имеются в виду геометрические размеры и теплотехнические параметры элементов ЛПТП) коэффициент тепловой эффективности ЛПТП прямо пропорционально зависит от среднего значения коэффициента конвективного теплообмена в внутренних каналах ($\bar{\alpha}_{квн}$).

Как показывают результаты расчетов, для листотрубных ЛПТП при значениях $a_{лн}=0,05\div 0,06$ м, $\delta_{лн}=0,00025\div 0,0003$ м, $\lambda_{лн}=300\div 400$ Вт/(м·°С)

и

$$K_{np-p-o} = 5\div 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}), \quad d_{нар} = 0,011 \text{ м}, \quad \eta_{лн} = 0,93\div 0,95 \quad \text{и} \quad \frac{\delta_{мз}}{\lambda_{мз} p_{мз}} + \frac{\delta_w}{\lambda_w p_{wcp}} \ll \ll$$

$\frac{1}{p_{wgn} \bar{\alpha}_{квн}}$ значение члена $\frac{2a_{лн} + d_{нар}}{2a_{лн} \eta_{лн} + d_{нар}}$ выражения (2.1) составляет

1,06÷1,15.

При значении $d_{вн}=0,01$ м, значение p_{wgn} , определенное по (2.5),

составляет 0,0314. Если принимать среднее значение $\frac{2a_{лн} + d_{нар}}{2a_{лн} \eta_{лн} + d_{нар}}$

0,5(1,06+1,15)=1,105 и $\frac{1}{p_{wgn}}=31,83$, то выражение (2.1) для практических

расчетов может быть представлено в виде

$$\eta_{лн} = \left(1,105 + \frac{31,8310}{\bar{\alpha}_{квн}} \right)^{-1}. \quad (2.6)$$

Для практических расчетов по определению значения $\eta_{лн}$ в [31; с. 142-146] для вынужденного течения теплоносителя в ТОК листотрубных ЛПТП (без какого либо обоснования) рекомендуется пользоваться значением $\bar{\alpha}_{квн}$, равным 1000 Вт/(м²·°С), которое можно получить только в условиях развитого турбулентного режима течения теплоносителя в ТОК ЛПТП. В этом случае значение $\eta_{лн}$, определенное по (2.6), составляет 0,88.

Однако, в реальных удельных расходах воды через коллектор (0,004÷0,008) кг/(м²·с) значение $\bar{\alpha}_{квн}$ существенно (в 2,5÷3,5 раза)

меньше, чем $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, а значение η_{mn} должно быть несколько меньше, чем 0,88.

Известно, что с целью обеспечения максимального значения поверхностной плотности потока суммарного СИ, падающего на поверхность СП корпуса ПСВК, последние устанавливаются под определенным (оптимальным) углом наклона к плоскости горизонта (α) при южной ориентации. Следовательно, ЛТПП и ее ТОК также имеют такой же угол наклона относительно плоскости горизонта.

Во многих случаях исходная (холодная) вода в ПСВК с целью экономии механической (электрической) энергии, необходимой для ее принудительной циркуляции, подается снизу, а горячая вода от него отводится сверху. В результате постепенного роста температуры воды возникает градиент плотности по направлению ее течения. Это в свою очередь приводит к возникновению в ТОК естественной конвекции. Следовательно, теплообмен в ТОК ЛТПП ПСВК формируются под совместном воздействии вынужденной и свободной конвекции. В этих условиях коэффициент конвективного теплообмена во внутренних каналах ЛТПП, как правило, определяется режимом и характером течения воды в них.

§2.2. Определение режима и характера течения теплоносителя во внутренних теплоотводящих каналах листотрубных лучепоглощающих теплообменных панелей плоских солнечных водонагревательных коллекторов

Режим течения теплоносителя (воды) в ТОК ЛТПП при заданном значении его внутреннего диаметра (d_{en}) зависит от его скорости и средней температуры (\bar{t}_f) и определяется числом Рейнольдса ($Re_{f,d}$)

$$Re_{f,d} = \frac{g_f d_{\text{вн}}}{\nu_f}, \quad (2.7)$$

где g_f - линейная скорость воды в ТОК; ν_f - кинематическая вязкость воды при ее средней температуре (\bar{t}_f).

$$\text{При } Re_{f,d} < Re_{f,d}^{\text{кр}} \cong 3200 \text{ и при } Ra_{f,d} = \frac{\beta_f g (\bar{t}_{\text{вн}} - \bar{t}_{\text{вх}}) d_{\text{вн}}^3}{a_f \nu_f} < 8,5 \cdot 10^5 \text{ (} Ra_{f,d} -$$

число Рэлея при \bar{t}_f ; β_f и a_f - соответственно, коэффициенты объемного расширения и температуропроводности воды при $\bar{t}_{f\ell}$; $g=9,8066 \text{ м/с}^2$ - гравитационное ускорение Земли; $\bar{t}_{\text{вн}}$ - средняя температура внутренней поверхности стенки ТОК; $\bar{t}_{\text{вх}}$ - температура воды на входе в ТОК) в соответствии с [26; с. 150-153, 27; с.210-212] режим течения ТН считается ламинарным.

В диапазоне изменения $Re_{f,d}$ от 3200 до 10000 (т.е. $3200 \leq Re_{f,d} \leq 10000$) и при $Ra_{f,d} > 8 \cdot 10^5$ режим течения ТН считается ламинарным, а характер её течения - вязкостно-гравитационным [27; с.210-212, 28; с. 92-93, 29; с. 122-124]. При $Re_{f,d} > 10000$ режим течения воды в ТОК ЛПТП является турбулентным [30; с. 258-261].

Согласно результатам предварительных расчетов по определению характера и режима течения воды в ТОК листотрубных ЛПТП ПСВК с площадью фронтальной поверхности корпуса ($F_{\text{фр}}$) $1,5 \div 2,5 \text{ м}^2$ в реальном диапазоне изменения расхода воды через них (G_f) (от 20 до 100 л/ч), значений $a_{\text{лн}}$ от 0,03 до 0,10, величины $d_{\text{вн}}$ - от 0,008 до 0,012, а также усредненный по длине ТОК средней массовой температуре воды ($\bar{t}_{f\ell}$) $38 \div 43^\circ\text{C}$, средней температуре внутренней поверхности стенки ТОК ($\bar{t}_{\text{вн}}$) $45 \div 50^\circ\text{C}$ и температуре исходной воды на входе в ПСВК ($t_{\text{вх}}$) $15 \div 20^\circ\text{C}$, соответствующие диапазоны изменения числа Рейнольдса

$(Re_{f,d} = \frac{g_f d_{\text{вн}}}{\nu_f} = \frac{4G_f}{n\pi\nu_f\rho_f d_{\text{вн}}})$, где n -число ТОК в листотрубном ЛПТП;

ρ_f -плотность воды при \bar{t}_f) и $Ra_{f,d}$ составляют $100\div 500$ и $(12\div 15)\cdot 10^6$, соответственно. В связи с тем, что указанные значения чисел $Re_{f,d}$ (в $6,4\div 32$ раза) меньшего критического значения ($Re_{f,d}^{\text{кр}} \cong 3200$), а $Ra_{f,d}$ - в $1,24\div 1,45$ раза больше, чем его критическое значение ($Ra_{f,d}^{\text{кр}} = 8,5\cdot 10^5$), режим течения ТН в ТОК листотрубной ЛПТП можно считать ламинарным, а характер ее течения – вязкостно-гравитационным.

§2.3. Коэффициент конвективного внутреннего теплообмена в теплоотводящих каналах плоских солнечных водонагревательных коллекторов

Опытные данные по теплообмену внутри наклонных труб при совместном действии вынужденной и свободной ламинарной конвекции весьма малочисленны [А9; стр. 10-16, А17; стр. 72-75]. Один из результатов экспериментальных исследований по определению зависимости $\bar{\alpha}_{\text{квн}}$ внутри трубы при изменении ее угла наклона от 0 до 90° (относительно вертикальной поверхности) при $Ra_{f,d} = 8\cdot 10^6$ приведен на рис.2.1 [26, с. 12-13]. Зависимость среднего значения числа Нуссельта

$(\bar{Nu}_{f,d} = \frac{\alpha_{\text{квн}} d_{\text{вн}}}{\lambda_f})$, где λ_f - коэффициент теплопроводности воды при $\bar{t}_{f\ell}$) от α ,

как видно из графиков на рис.2.1, весьма значительна и притом неодинакова для различных значений $Pe_{f,d} \frac{d_{\text{вн}}}{\ell_{\text{мк}}}$ (где $Pe_{f,d} = Re_{f,d} Pr_f$ - число

Пекла при $\bar{t}_{f\ell}$; $Pr_f = \frac{V_f}{a_f}$ - число Прандтля при $\bar{t}_{f\ell}$; ℓ_{mk} - длина ТОК). Так,

значение $\bar{\alpha}_{к_{\text{вн}}}$ внутри горизонтально расположенной трубы от 1,33 (при

$Pe_{f,d} \frac{d_{\text{вн}}}{\ell_{mk}} \approx 44$) до 1,93 (при $Pe_{f,d} \frac{d_{\text{вн}}}{\ell_{mk}} \approx 120$) раза больше чем у вертикально

расположенной трубы.

Если учесть, что в реальных условиях работы ПСВК в СГВС

значения $Ra_{f,d} = (1,05 \div 1,23) \cdot 10^6$ в $6,5 \div 7,6$ и $Pe_{f,d} \frac{d_{\text{вн}}}{\ell_{mk}} \approx 3,0 \div 20,0$

($Pe_{f,d} \approx 120 \div 800$, $Pr_f = 3,9 \div 4,1$, $d_{\text{вн}}/\ell_{mk} = 0,006 \div 0,007$) в $9 \div 17$ раз меньше, чем

значения таковых в экспериментах [26, с. 11-15], тогда невозможность

применения их результатов для расчета значения $\bar{\alpha}_{к_{\text{вн}}}$ во внутренних

каналах ЛПТП ПСВК становится очевидной.

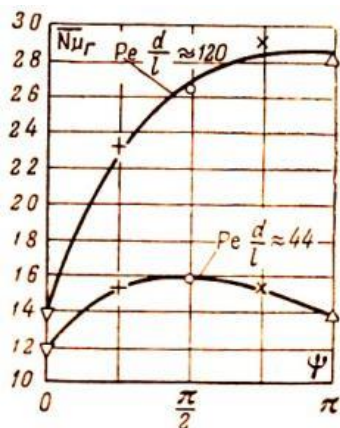


Рис.2.1. Зависимость теплоотдачи от угла наклона трубы относительно вертикали (ψ) при $(Gr Pr)_r \approx 8 \cdot 10^6$.

Результаты теоретических исследований по определению коэффициента конвективного теплообмена внутри наклоненных труб при совместном действии вынужденной и свободной конвекции приведены в [29; с. 120-125]. При выполнении расчетно-теоретических значений в [29; с. 120-125] рассмотрен случай полностью развитого ламинарного потока при постоянном градиенте давления и постоянном тепловом потоке.

Свойства жидкости приняты постоянными, за исключением изучения плотности в членах, учитывающих подъемную силу. Рассмотрен только направленный вверх поток. Поля скоростей и температур рассчитаны методом теории возмущений с помощью степенных рядов для чисел Ra.

Значения чисел Nu рассчитаны для случая температурного напора, отнесенного к средней объемной температуре жидкости.

Согласно результатам исследований [29; с. 125-126], по мере изменения наклона трубы от горизонтального положения, значение $\bar{\alpha}_{к_{\theta}}$ возрастает вплоть до максимального значения, которое может иметь место до того, как будет достигнуто вертикальное положение. Угол наклона трубы, которому соответствует это максимальное значение, по мнению авторов [29; с. 125-126], является функцией чисел $Ra_{f,d}$, $Re_{f,d}$, Pr_f и в большинстве случаев лежит между 20 и 60°. Как видно, результаты теоретических исследований [29; с. 125-126] противоречат результатам экспериментальных исследований [26; с. 150-153], которые были обсуждены выше.

Следует отметить, что теоретические исследования процессов конвективного теплообмена, как известно, базируются на предположении об устойчивости течения жидкости, которое удовлетворяет уравнениям неразрывности, движения и энергии [30; с. 300-305]. Однако, как отмечено в [28; с. 92-93], не всякое движение, предсказуемое теорией, существует в действительности. По этой причине полученные решения, основанные на ряде упрощающих предпосылок, являются приближенными, и их расхождения с опытными данными может достигать до 100 % и более.

§2.4. Пути определения коэффициента конвективного теплообмена во внутренних теплоотводящих каналах листотрубных лучепоглощающих теплообменных панелей плоских солнечных водонагревательных коллекторов

В связи с ситуацией по существу рассматриваемой задачи для определения значения коэффициента конвективного теплообмена ($\bar{\alpha}_{к_{\theta}}$)

на внутренних поверхностях стенок ТОК листотрубных ЛПТП ПСВК, наклоненных к горизонту нами предложен бесконтактный метод определения $\bar{\alpha}_{к_{вн}}$, основанный на равенстве тепловых потоков, подводимого к внутренней поверхности стенки ТОК ЛПТП к нагреваемой воде ($Q_{отв}$) и отводимого от ПСВК полезного тепла нагреваемой водой ($Q_{отв}$).

Тепловой поток, отводимый от ПСВК ($Q_{отв}$), который равен полезной теплопроизводительности коллектора ($Q_{пол}$) по результатам измерения расхода воды через него (G_f) и разности ее температур на входе в коллектор ($t_{f_{вх}}$) и на выходе из него ($t_{f_{вых}}$), определяется по формуле

$$Q_{пол} = (Gc_p)_f (t_{f_{вых}} - t_{f_{вх}}), \quad (2.8)$$

с другой стороны, тепловой поток, подводимой от внутренней поверхности стенки ТОК ЛПТП к нагреваемой воде ($Q_{под}$), также равный полезной теплопроизводительности коллектора ($Q_{пол}$), может определяться из выражения :

$$Q_{пол} = \bar{\alpha}_{к_{вн}} \sum F_{мк_{вн}}^{\delta} (\bar{t}_{w_{вн}} - \bar{t}_{f_{\ell}}), \quad (2.9)$$

где

$$\sum F_{мк_{вн}}^{\delta} = n \pi d_{вн} \ell_{мк} \quad (2.10)$$

– суммарная боковая теплообменная площадь внутренних поверхностей стенок ТОК листотрубной ЛПТП;

$$n = \frac{D_{mn}}{2a_{.m} + d_{нар}} \quad (2.11)$$

– число ТОК в ЛПТП рассматриваемого типа;

$$D_{mn} = \frac{F_{mn}}{L_{mn}} \quad (2.12)$$

– ширина ЛПТП (L_{mn} -длина и F_{mn} -площадь поверхности ЛПТП).

Из условия равенства значений $Q_{пол}$, определенных по (2.8) и (2.9) и с учетом значений $\sum F_{mk\theta n}^{\delta}$ по (2.9) и n (2.10), имеем

$$\bar{\alpha}_{\kappa\theta n} = \frac{(\dot{m}c_p)_f (t_{f\text{вх}} - t_{f\text{вх}})(2a_{.mn} + d_{нар})L_{mn}}{K_{зан} \pi d_{\theta n} \ell_{mk} (\bar{t}_{w\theta n} - \bar{t}_{f\ell})}, \quad (2.13)$$

где

$$\dot{m}_f = \frac{G_f}{F_{\phi p}} \quad (2.14)$$

– удельный (отнесённый к единице площади фронтальной поверхности ПСВК) расход воды через ЛПТП;

$$K_{зан} = \frac{F_{mn}}{F_{\phi p}} \quad (2.15)$$

– коэффициент заполнения рассматриваемого коллектора; $\bar{t}_{w\theta n}$ - средняя (по длине ТОК) температура внутренней поверхности стенки ТОК ЛПТП; $\bar{t}_{f\ell}$ - усредненная по длине ТОК средняя массовая температура нагреваемой в нем воды; ℓ_{mk} - длина ТОК.

Значения $\bar{t}_{w\theta n}$ и $\bar{t}_{f\ell}$ в (2.9) и (2.13) могут быть определены по результатам краткосрочного теплового тестирования ПСВК в натуральных квазистационарных условиях [31; с. 10-16,32; с. 26-29].

§2.5. Тепловая модель лучепоглощающей теплообменной панели плоских солнечных водонагревательных коллекторов для определения средней температуры внутренней поверхности стенки теплоотводящих каналов

Как следует из анализа выражения (2.13) для определения значения $\bar{\alpha}_{\kappa\theta n}$ во внутренних каналах ЛПТП при прочих равных условиях

(имеются в виду \dot{m}_f , $t_{f_{\text{ВЫХ}}}$, $t_{f_{\text{ВХ}}}$, $2a_{\text{л}}$, $d_{\text{нар}}$, $K_{\text{зан}}$, $d_{\text{вн}}$, $\ell_{\text{мк}}$ и $L_{\text{мн}}$) требуются значения средней (по длине ТОК) температуры внутренней поверхности стенки рассматриваемого ТОК ($\bar{t}_{\text{вн}}$) и усредненный (по длине ТОК) средней массовой температуры теплоносителя ($\bar{t}_{\text{фл}}$).

Отметим, что для определения значения $\bar{t}_{\text{фл}}$ нами в работе [33, с.172-176] предложен метод, основанный на результатах краткосрочных натуральных испытаний ПСВК в натуральных квазистационарных условиях и установлено выражение

$$\bar{t}_{\text{фл}} = t_o + \frac{q_{\text{нозлр}}^{\Sigma}}{K_{\text{нрр-о}}} - (t_{\text{фвх}} - t_{\text{фвх}}) \cdot \left(\ln \frac{\frac{q_{\text{нозлр}}^{\Sigma}}{K_{\text{нрр-о}}} + t_o - t_{\text{фвх}}}{\frac{q_{\text{нозлр}}^{\Sigma}}{K_{\text{нрр-о}}} + t_o - t_{\text{фвх}}}} \right)^{-1}, \quad (2.16)$$

где t_o - температура окружающей среды; $q_{\text{нозлр}}^{\Sigma}$ - поверхностная плотность потока суммарного (прямого и диффузного) солнечного излучения, поглощенного зачерненной поверхностью ЛПТП; $K_{\text{нрр-о}}$ - приведенный к единице площади фронтальной поверхности ПСВК суммарный коэффициент тепловых потерь ЛПТП в окружающую среду.

Значение $q_{\text{нозлр}}^{\Sigma}$ в решении (2.16) определяется из выражения

$$q_{\text{нозлр}}^{\Sigma} = (\alpha_p \tau_{\text{сн}})_{\text{эфф}}^{\text{нр}} q_{\text{над}}^{\text{нр}} + (\alpha_p \tau_{\text{сн}})_{\text{эфф}}^{\text{диф}} q_{\text{над}}^{\text{диф}}, \quad (2.17)$$

где $(\alpha_p \tau_{\text{сн}})_{\text{эфф}}^{\text{нр}}$ и $(\alpha_p \tau_{\text{сн}})_{\text{эфф}}^{\text{диф}}$ - соответственно, эффективная приведённая (к единице площади фронтальной поверхности ПСВК) поглощательная способность зачерненной поверхности ЛПТП прямого и диффузного СИ.

Значение $K_{\text{нрр-о}}$ в (2.16) для ПСВК среднего качества (с обычным лучепоглощающим покрытием на поверхности ЛПТП) с толщиной замкнутой воздушной прослойки между зачерненной поверхностью ЛПТП и внутренней поверхностью СП ($\delta_{\text{вн}}$) $15 \pm 1 \text{ мм}$ в зависимости от средней рабочей температуры поверхности ЛПТП (\bar{t}_p) и температуры окружающей среды (t_o) может быть определено из аппроксимационной формулы [34; с. 10-14]

$$K_{\text{нрр-о}} = 5,8426 + 0,0218\bar{t}_p + 0,0117t_o, \text{ Вм}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}), \quad (2.18)$$

Значение \bar{t}_p , входящего в (2.18), определяется из [41]

$$\bar{t}_p = 22,9358 \left\{ \left[\left((5,8426 - 0,0101t_o)^2 + 0,0872 * \right) \right]^{0,5} - 5,8426 + 0,0101t_o \right\}, \text{ } ^\circ\text{C.} \quad (2.19)$$

Значение удельной (отнесённой к единице площади фронтальной поверхности корпуса) теплопроизводительности ПСВК $q_{нол}$ в (2.19) определяется из выражения

$$q_{нол} = \frac{Q_{нол}}{F_{фр}} = (\dot{m}c_p)_f (t_{f_{вых}} - t_{f_{вх}}) \quad (2.20)$$

по результатам его теплового тестирования.

Для определения значения $\bar{t}_{w_{ен}}$ нами предложена тепловая модель ЛПТП, сущность которой заключается в следующем.

В отличие от традиционных рекуперативных теплообменных аппаратов, в ПСВК значение $\bar{t}_{w_{ен}}$ формируется под воздействием многочисленных факторов, таких как теплотехнические показатели ограждающих элементов, оптические характеристики поверхности его СП и ЛПТП, приход СИ, температура ОС и т.п. Очевидно, что разновременность и неодинаковость внешних условий проведения экспериментальных исследований ПСВК по определению значения $\bar{t}_{w_{ен}}$ в натуральных условиях требует много времени, материальных и финансовых затрат. Вместе с тем, результаты этих исследований не всегда позволяют установить однозначную и достоверную взаимосвязь между значениями $\bar{t}_{w_{ен}}$ и перечисленными выше внешними факторами.

Поэтому более рациональным считается определение значения $\bar{t}_{w_{ен}}$ путем моделирования тепловых процессов, протекающих в ЛПТП ПСВК по заданным значениям оптических свойств и теплотехнических показателей их элементов [32; с. 24-29].

В целях обеспечения общности получаемого решения поставленной задачи сначала рассмотрим листотрубную конструкцию ЛПТП ПСВК, в которой тепловой контакт между ЛПП и ТОК является идеальным (рис.2.2). Как показывают результаты исследований [1; с. 59-79], расчетные выражения, выведенные для листотрубных ЛПТП ПСВК, применимы для большинства конструкций плоских проточных ЛПТП.

Листотрубная ЛПТП состоит из $2n$ штук ЛПП (т.е. ребер) шириной каждой a_m и n штук ТОК круглой формы с внутренним ($d_{вн}$) и наружным ($d_{нар}$) диаметрами, соединенных общими (подающим и отводящим) гидравлическими каналами, обеспечивающими равномерное течение воды по ТОК. Длины ЛПП (ℓ_m) и ТОК (ℓ_{mk}) равны между собой, т.е. $\ell_m = \ell_{mk}$. Локальная температура ЛПП в зоне теплового контакта с ТОК (t_{mk}) равна температуре наружной поверхности ТОК ($t_{wнар}$), т.е. $t_{mk} = t_{wнар}$. Площадь поверхности ЛПТП (F_{mn}), без учета площади поверхности ее гидравлических каналов, равна

$$F_{mn} = (2a_m + d_{нар}) \ell_m n \quad . \quad (2.21)$$

Согласно [1; с. 59-65, 35; с. 715-719], поверхностная плотность потока полезной энергии на наружной поверхности ТОК ЛПТП ПСВК ($q_{пол}$) определяется из отношения суммы поверхностных плотностей двух тепловых потоков: - переданного от ЛПП к наружной поверхности ТОК путём теплопроводности, отнесённого к единице её длины ($q_{пол\ell_m}$), и - непосредственно поглощённого наружной поверхностью рассматриваемого ТОК суммарного СИ, также отнесённого к единице его длины ($q_{пол\ell_{mk}}$), к ее ширине $(2a_m + d_{нар})n$, т.е.:

$$q_{пол} = \frac{q_{пол\ell_m} + q_{пол\ell_{mk}}}{(2a_m + d_{нар})n}, \quad (2.22)$$

где

$$q_{пол\ell_m} = 2a_m \eta_m \left[q_{ногл_p}^{\Sigma} - K_{np-p-o} (\bar{t}_{wнар} - t_o) \right] n; \quad (2.23)$$

$$q_{пол\ell_{mk}} = d_{нар} \left[q_{ногл_p}^{\Sigma} - K_{np-p-o} (\bar{t}_{wнар} - t_o) \right] n; \quad (2.24)$$

$\bar{t}_{wнар}$ - температура наружной стенки ТОК; t_o - температура ОС.

Подставляя значения $q_{пол\ell_m}$ и $q_{пол\ell_{mk}}$ из (2.23) и (2.24), соответственно, в отношение (2.22) и с учётом выражения (2.26), получим:

$$q_{пол} = \frac{(2a_m \eta_m + d_{нар})}{2a_m + d_{нар}} \left[q_{ногл_p}^{\Sigma} - K_{np-p-o} (\bar{t}_{wнар} - t_o) \right]. \quad (2.25)$$

Поток полезной тепловой энергии, определяемый по (2.25), передаётся от наружной поверхности стенки ТОК к ее внутренней поверхности, т.е.

$$q_{пол} = \frac{\lambda_{ст}}{\delta_{ст}} \frac{P_{wcp}}{2a_{.л} + d_{нар}} (\bar{t}_{wнар} - t_{wвн}). \quad (2.26)$$

Выражения (2.25) и (2.26) представляют собой систему балансовых уравнений (т.е. математической модели теплового баланса) листотрубной ЛПТП ПСВК.

Из совместного рассмотрения выражений (2.25) и (2.26) (с целью исключения из них неизвестного $\bar{t}_{wнар}$) и с учётом выражения для определения значения поверхностной плотности полезного получаемого теплового потока из ПСВК, определяемого выражением (2.20), а также значения P_{wcp} из (2.29), получим:

$$\bar{t}_{wвн} = t_o + \frac{q_{пол}^{\Sigma}}{K_{np-p-o}} - (\dot{m}c_p)_f (t_{fвх} - t_{fвх})(2a_{.л} + d_{нар}) \left[\frac{1}{K_{np-p-o} (2a_{.л} \eta_{.л} + d_{нар})} + \frac{\ln \frac{d_{нар}}{d_{вн}}}{2\pi\lambda_w} \right], \quad (2.27)$$

где, \dot{m}_f - удельный (отнесённый к единице площади фронтальной поверхности корпуса ПСВК) массовый расход воды через ЛПТП; c_{pf} - удельная теплоёмкость воды; $t_{fвх}$ и $t_{fвх}$ - соответственно, температура исходной (холодной) воды на входе в коллектор и горячей воды на выходе из него;

$$F_{фр} = \frac{F_{mn}}{K_{зан}} \quad (2.28)$$

-площадь фронтальной поверхности корпуса ПСВК.

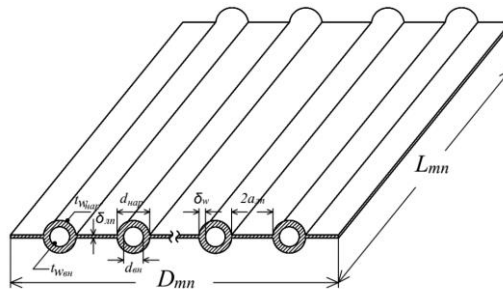


Рис.2.2. Принципиальная схема листотрубной ЛПТП ПСВК с идеальным тепловым контактом между ЛПП и ТОК: D_{mn} и L_{mn} - ширина и длина ЛПТП; $a_{лн}$ и $\delta_{лн}$ -

соответственно, ширина и толщина ЛПП (ребра); $d_{нар}$, $d_{вн}$ и δ_w – соответственно, наружный, внутренний диаметры и толщина стенки ТОК

Подставляя значения $\bar{t}_{w_{вн}}$ из (2.27) и \bar{t}_{f_e} из (2.16), решение для $\bar{\alpha}_{\kappa_{вн}}$ (2.13) получим в виде:

$$\bar{\alpha}_{\kappa_{вн}} = \frac{(\dot{m}c_p)_f}{K_{зан} \pi d_{вн} \ell_{мк}} \frac{(2a_{лн} + d_{нар})L_{mn}}{\left(\ln \frac{\frac{q_{нозлр}^{\Sigma}}{K_{нрр-о}} + t_o - t_{f_{вх}}}{\frac{q_{нозлр}^{\Sigma}}{K_{нрр-о}} + t_o - t_{f_{вых}}} \right)^{-1} \frac{(\dot{m}c_p)_f}{K_{нрр-о}} \frac{2a_{лн} + d_{нар}}{2a_{лн} \eta_{лн} + d_{нар}}} \quad (2.29)$$

Аналогичным образом может быть получено выражение для определения значения $\bar{t}_{w_{вн}}$ в ПСВК с проточной ЛПП, имеющей форму тонкого параллелепипеда (рис.2.3), для которой $a_{лн}=0$; $\eta_{лн}=1$; $p_{w_{ср}} \cong D_{mn}$ и $\bar{t}_{w_{нар}} = \bar{t}_p$ (где D_{mn} ширина рассматриваемой панели) в виде:

$$\bar{t}_{w_{вн}} = t_o + \frac{q_{назлр}^{\Sigma}}{K_{нрр-о}} - (\dot{m}c_p)_f (t_{f_{вх}} - t_{f_{вх}}) \left[\frac{1}{K_{нрр-о}} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} \right]. \quad (2.30)$$

Отметим, что выражение (2.29), как частный случай выражения (2.27), может быть получено путем реализации математической модели коллектора рассматриваемого типа, балансовые уравнения которой имеют вид (2.20), а именно:

$$q_{пол} = q_{нозлр}^{\Sigma} - K_{нрр-о} (\bar{t}_p - t_o) \quad (2.31)$$

и

$$q_{пол} = \frac{\lambda_w}{\delta_w} (\bar{t}_p - \bar{t}_{w_{вн}}). \quad (2.32)$$

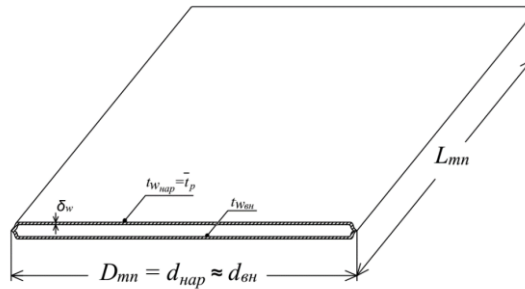


Рис. 2.3. Принципиальная схема ЛПТП, имеющей форму тонкого параллелепипеда, ПСВК: D_{mn} и L_{mn} – ширина и длина ЛПТП; δ_w – толщина стенки; \bar{t}_p – средняя рабочая температура поверхности ТОК

Как показывают результаты расчетных исследований, значения $\frac{\ln \frac{d_{нар}}{d_{вн}}}{2\pi\lambda_w}$ в (2.27) и $\frac{\delta_w}{\lambda_w}$ в (2.29) для ЛПТП, изготовленных из металла, существенно (более, чем в 3000 раз) меньше, чем $\frac{1}{(2a_{.m}\eta_{.m} + d_{нар})K_{np-p-o}}$ в (2.27) и $\frac{1}{K_{np-p-o}}$ в (2.29). И в связи с этим, выражения (2.27) и (2.29) могут быть представлены в виде:

$$\bar{t}_{w_{вн}} = t_o + \frac{q_{полз}^{\Sigma}}{K_{np-p-o}} - (\dot{m}c_p)_f (t_{f_{вх}} - t_{f_{вх}}) \frac{2a_{.m} + d_{нар}}{K_{np-p-o}(2a_{.m}\eta_{.m} + d_{нар})} \quad (2.33)$$

и

$$\bar{t}_{w_{вн}} = t_o + \frac{q_{полз}^{\Sigma} - (\dot{m}c_p)_f (t_{f_{вх}} - t_{f_{вх}})}{K_{np-p-o}}. \quad (2.34)$$

Относительная погрешность расчетов при этом составляет менее 0,05%.

Из анализа решений (2.33) и (2.34) следует, что при $\dot{m}_f = 0$ (т.е. при $q_{пол} = 0$) значение $\bar{t}_{w_{вн}}$ равно значению равновесной температуры поверхности ЛПТП ПСВК, определяемому по [33; с. 172-176] как:

$$\bar{t}_{p_p} = t_o + \frac{q_{нагр}^{\Sigma}}{K_{np-p-o}}, \quad (2.35)$$

что подтверждает их достоверность.

§2.6. Новый подход по определению удельной теплопроизводительности плоских солнечных водонагревательных коллекторов

Для практической реализации предлагаемого подхода по определению значения $\bar{\alpha}_{к_{вн}}$ во внутренних каналах листотрубных ЛПТП ПСВК используются впервые полученные результаты исследований по опреде-

лению существующих параметров: - средней температуры внутренней поверхности стенки ТОК ЛПТП ($\bar{t}_{w_{\text{вн}}}$); - усредненной по длине ТОК средней массовой температуры воды (\bar{t}_{fl}); - средней по поверхности рабочей температуры ЛПТП рассматриваемого типа (\bar{t}_p); - коэффициента тепловой эффективности (η_{mn}); и - приведенного к единице площади фронтальной поверхности ПСВК суммарного коэффициента тепловых потерь ЛПТП в ОС через ограждающие элементы его корпуса (K_{np-o}); - поверхностные плотности потоков прямого ($q_{na\phi}^{np}$) и диффузного ($q_{na\phi}^{du\phi}$) СИ, падающего на поверхность СП корпуса ПСВК, температуры ОС (t_0), (результаты натурных измерений) и лабораторных исследований и соответствующих расчетов по эффективному определению приведенной поглотительной способности зачерненной поверхности ЛПТП (с целью определения значения $q_{ногл}^{\Sigma}$), а также результаты краткосрочных тепловых испытаний базового ПСВК по определению его удельной теплопроизводительности ($q_{нол}$) в натурных квазистационарных условиях.

Приводим пример практической реализации предложенного подхода базовой ПСВК среднего качества фронтальной поверхности корпуса ($F_{фр}$) $1,9375 \text{ м}^2$ ($1,25 \times 1,55$), имеющего СП из оконного стекла толщиной (δ_c) $0,004 \text{ м}$ с коэффициентом ослабления СИ (β_c) 35 м^{-1} . ЛПТП листотрубного типа, изготовленной из меди, имеет площадь фронтальной поверхности (F_{mn}) $1,8 \text{ м}^2$ ($1,2 \times 1,5$). Число ТОК ЛПТП (n) 10 шт., внутренний ($d_{\text{вн}}$) и наружный ($d_{\text{нар}}$) диаметры ТОК $0,010 \text{ м}$ и $0,011 \text{ м}$, соответственно. Длина (ℓ_{mk}) и толщина стенки ТОК (δ_w) $1,45 \text{ м}$ и $0,5 \text{ мм}$, соответственно. Общая высота подводящего и отводящего

гидравлических каналов ЛПТП, обеспечивающих равномерное движение воды по ее ТОК, составляет 0,05 м. Число ЛПП (ребра) ЛПТП ($2n$) 20 шт., ширина ($a_{лп}$) и толщина ($\delta_{лп}$) ЛПП 0,054 м и 0,25 мм, соответственно. Поверхность ЛПТП покрыта черной эмалью ПФ 115. Толщина замкнутой воздушной прослойки, заключенной между зачерненной поверхностью ЛПТП и внутренней поверхностью СП($\delta_{сп}$), равна 14 мм. Коэффициент заполнения коллектора ($K_{зан}$) 0,929. Коллектор ориентирован на юг и установлен под углом 30° к плоскости горизонта.

Экспериментальные исследования по определению удельной теплопроизводительности ($q_{пол}$) коллектора в натуральных условиях проведены в околополуденные часы 15.08.2017г. Согласно результатам измерений $q_{на\dot{q}}^{np} = 835 \text{ Вт/м}^2$, $q_{на\dot{q}}^{дуф} = 95 \text{ Вт/м}^2$ и $t_o = 33,4^{\circ}\text{C}$. Скорость ветра (v) 2,8 м/с. При $G_f = 21,3 \text{ л/час}$, значение \dot{m}_f , определенное по (1.13), составляет $3,054 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$. При $t_{f_{ex}} = 21,5^{\circ}\text{C}$, $t_{f_{вых}} = 60,8^{\circ}\text{C}$, и $c_{pf} = 4186,8 \text{ Дж/(кг} \cdot ^{\circ}\text{C)}$ значение $q_{пол}$, определенное по (2.20), составляет $502,47 \text{ Вт/м}^2$.

Согласно результатам лабораторных измерений и соответствующих расчетов, при $K_{зан} = 0,929$ и коэффициенте пропускания СИ слоя пыли и грязи на наружной поверхности СП ($\tau_{нз}$) 0,94 и $(\alpha_p \tau_{cn})_{эфф}^{np} = 0,705$ и $(\alpha_p \tau_{cn})_{эфф}^{дуф} = 0,613$ значение $q_{позлр}^{\Sigma}$, определенное по формуле (1.17), составляет $646,91 \text{ Вт/м}^2$.

Значение \bar{t}_p , определенное по (2.19), при $t_o = 33,4^{\circ}\text{C}$, $q_{позлр}^{\Sigma} = 646,91 \text{ Вт/м}^2$ и $q_{пол} = 502,51 \text{ Вт/м}^2$, составляет $52,95^{\circ}\text{C}$.

Соответствующее значение K_{np-p-o} , определенное из аппроксимационной формулы (2.18), при $\bar{t}_p = 52,95^\circ C$ и $t_o = 33,4^\circ C$, составляет $7,388 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ C)$.

Значение η_{mn} , определенное по (2.2), при $K_{np-p-o} = 7,388 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ C)$, $a_{ln} = 0,054 \text{ м}$, $\delta_{ln} = 0,25 \text{ мм}$ и $\lambda_{ln} = 390 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ C)$, составляет $0,93$.

Значение $\bar{\alpha}_{квн}$, определенное по выражению (2.29), при указанных выше значениях параметров, входящих в него, составляет $385,48 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ C)$.

Достоверность предложенного подхода по определению значения $\bar{\alpha}_{квн}$ во внутренних каналах ЛПТП ПСВК может быть проверена сопоставлением значений η_{mn} , определенных по формуле (2.1) и по формуле

$$\eta_{mn} = \frac{(\dot{m}c_p)_f}{K_{np-p-o}} \cdot \ln \frac{\frac{q_{nozп}^\Sigma}{K_{np-p-o}} + t_o - t_{fex}}{\frac{q_{nozп}^\Sigma}{K_{np-p-o}} + t_o - t_{fвых}}, \quad (2.36)$$

полученной авторами [33; с. 172-176].

Согласно результатам расчетов, при $2a_{ln} + d_{нар} = 0,119 \text{ м}$, $2a_{ln}\eta_{mn} + d_{нар} = 0,1114 \text{ м}$, $K_{np-p-o} = 7,388 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ C)$ и $d_{вн} = 0,01 \text{ м}$ значение η_{mn} , определенное по (2.27), при $\bar{\alpha}_{квн} = 385,48 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ C)$, составляет $0,8755$.

Значение η_{mn} , определенное по (2.36), при $(\dot{m}c_p)_f = 12,7855 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ C)$, $q_{nozп}^\Sigma = 646,91 \text{ Вт}/\text{м}^2$, $K_{np-p-o} = 7,388 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ C)$, $t_{fex} = 21,5^\circ C$, $t_{fвых} = 60,5^\circ C$ и $t_o = 33,4^\circ C$, составляет $0,870$. Очень близкое совпадение значений η_{mn} (разница $0,6\%$), определенных по выражениям (2.1) (при $\frac{\delta_{mз}}{\lambda_{mз}P_{mз}} + \frac{\delta_w}{\lambda_w P_{wcp}} \ll \ll$

$\frac{1}{\bar{\alpha}_{\kappa_{\text{вн}}} p_{\text{вн}}}$) и (2.36) подтверждает высокую достоверность предложенного подхода по определению конвективного теплообмена во внутренних ТОК листотрубных ЛПТП ПСВК.

Аналогичным образом устанавливаем выражения для определения значения $\bar{\alpha}_{\kappa_{\text{вн}}}$ во внутренних ТОК проточной ЛПТП, имеющей форму тонкого параллелепипеда, принципиальная схема которой приведена на рис.2.3.

Подставляя значения $\bar{t}_{\text{вн}}$ для ЛПТП рассматриваемого типа из (2.30) и \bar{t}_{f_l} из (2.16) в (2.13) и с учетом, что для данной конструкции ЛПТП $a_{ln}=0$; $\eta_{ln}=1$; $n=1$; и $d_{нар} \cong D_{mn}$ и $\bar{t}_{\text{нар}} = \bar{t}_p$, получим

$$\bar{\alpha}_{\kappa_{\text{вн}}} = \frac{(\dot{m}c_p)_f}{K_{\text{зан}} \left[\left(\ln \frac{\frac{q_{\text{нозл}p}^{\Sigma}}{K_{np-p-o}} + t_o - t_{f_{\text{вх}}}}{\frac{q_{\text{нозл}p}^{\Sigma}}{K_{np-p-o}} + t_o - t_{f_{\text{вых}}}} \right)^{-1} - (\dot{m}c_p)_f \left(\frac{1}{K_{np-p-o}} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} \right) \right]} \quad (2.37)$$

При $a_{ln}=0$; $\eta_{ln}=1$; $d_{\text{вн}} \approx d_{нар}$; $p_{\text{всп}} \approx p_{\text{вн}}$ выражение (2.1) при $\delta_{mz}=0$ может быть представлено в виде

$$\eta_{mn} = \left[1 + K_{np-p-o} \left(\frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_{\kappa_{\text{вн}}}} \right) \right]^{-1}. \quad (2.38)$$

Как показывают результаты расчетов, при значениях $K_{\text{зан}}=0,929$, $q_{\text{нозл}p}^{\Sigma}=646,91 \text{ Вт/м}^2$, $t_o=33,4^{\circ}\text{C}$, $\bar{t}_p=52,95^{\circ}\text{C}$, $t_{f_{\text{вх}}}=21,5^{\circ}\text{C}$, $t_{f_{\text{вых}}}=60,8^{\circ}\text{C}$, $K_{np-p-o}=7,388 \text{ Вт/(м}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$, $\delta_w=1,0\div 1,5 \text{ мм}$, $\lambda_w=40-50 \text{ Вт/(м}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$, $\dot{m}_f=3,054 \times 10^{-3} \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$ значение $\bar{\alpha}_{\kappa_{\text{вн}}}$, определенное по (1.39), для рассматриваемой конструкции ЛПТП, составляет $53,2 \text{ Вт/(м}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$, а

значение η_{mn} , определенное по (2.38), составляет 0,88. Значение η_{mn} , определенное по (2.36), при этих условиях составляет 0,87.

Как видно, разница значений η_{mn} , определенных по формулам (2.36) и (2.38), для ЛПТП, имеющей тонкую параллелепипедную форму, составляет 1,15%, что подтверждает достоверность выражения для определения значения $\bar{\alpha}_{\text{квн}}$ во внутренних каналах ЛПТП, имеющих тонкую параллелепипедную форму.

Выводы по второй главе

В результате выполненных исследований были получены следующие результаты:

1. Установлены реальные режим и характер течения ТН вТОК листотрубных ЛПТП ПСВК.

2. Предложен новый подход по определению коэффициента конвективного теплообмена во внутренних ТОК ЛПТП ПСВК.

3. Установлены расчетные выражения для определения значений средних температур внутренних поверхностей стенок ТОК ЛПТП, имеющих листотрубную и плоскую параллелепипедную формы.

4. Предложены расчетные выражения для определения значений коэффициентов конвективного теплообмена во внутренних каналах ЛПТП, имеющих листотрубную и плоскую параллелепипедную формы, на основе результатов краткосрочного теплового тестирования ПСВК в натуральных квазистационарных условиях.

5. Выполнен пример практической реализации предложенного подхода для определения коэффициента конвективного теплообмена во внутренних ТОК ЛПТП ПСВК на основе удельной теплопроизводительности ПСВК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов проведенных научных исследований сформулированы следующие основные выводы:

Определены значения числа Рейнольдса (Re) и комплекса $GrPr$, на основе которых определены режим и характер течения теплоносителя внутри теплоотводящих каналов лучепоглощающих теплообменных панелей, имеющих листотрубную и тонкую параллелепипедную формы плоских солнечных водонагревательных коллекторов. В результате определения значений (числа Re : для листотрубной лучепоглощающей панели - $107,34 \div 536,68$, для тонкой параллелепипедной формы лучепоглощающей панели - $7,03 \div 35,13$ и значений комплекса $GrPr > 8,5 \cdot 10^5$) установлено, что режим течения теплоносителя в теплоотводящих каналах лучепоглощающей панели является ламинарным, а характер – вязкостным.

Обоснованы и получены расчетные выражения для определения значений средней температуры внутренней поверхности стенки теплоотводящих каналов лучепоглощающих теплообменных панелей и температуры внутренней и наружной поверхности светопрозрачного покрытия плоских солнечных водонагревательных коллекторов, в результате проведенных расчетов выявлена существенная зависимость их температуры от излучательной способности зачерненной поверхности лучепоглощающих теплообменных панелей, которая составляет $33,94^\circ\text{C}$ и $33,34^\circ\text{C}$ при $\varepsilon_p = 0,15$ и $40,56^\circ\text{C}$ и $39,54^\circ\text{C}$ при $\varepsilon_p = 0,95$ с учетом скорости ветра $v = 3 \text{ м/с}$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аvezов Р.Р., Орлов А.Ю. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения. - Ташкент: Фан, 1988. 285с.
2. Бутузov В.А. Солнечное теплоснабжение: статистика мирового рынка и особенности российского опыта. - Теплоэнергетика, 2018, № 10, с. 78–88.
3. Sarbu I., Sebarchievici C. Solar Collectors. Solar Heating and Cooling Systems. ELSEVIOR. 2017. pp. 29–97.
4. Петухов Б.В. Солнечные водонагреватели. Автореф. дис.. канд. тех. наук. -М.: 1946. - 20 с.
5. Петухов Б.В. Метод расчета солнечных водонагревателей /Использование солнечной энергии. Сб. №1.- М.: Изд. АН СССР.1957. – с.177-201.
6. Whillier A., Saluja G. Effect of materials and Conduction Details on the Thermal Performance of the Solar Water Heaters //Solar Energy. 1965. V.9, №1, - pp. 21-26.
7. Ферт А.Р. Современное состояние и опыт применения систем солнечного тепло – и хладоснабжения/Системы солнечного тепло и хладоснабжения. Под ред. Э.В. Сарнацкого и С.А. Чистовича. – М.: Стройиздат.1990, -с. 24-55.
8. Аvezов Р.Р., Кахаров Н.А. Оптимизация давления сжатия в тепловом зазоре разборных листотрубных теплоприемников солнечных коллекторов //Гелиотехника. 1993. №5, - с. 21-24.
9. Байбутаев К.Б. Сравнительные испытания различных систем солнечных водонагревателей. Автореф. дис.. канд. тех. наук. – М.: 1955. -16 с.
10. Марков Г.И., Рекант Н.Б. Испытание солнечных водонагревателей в Ташкенте в 1952-1953гг. /Использование солнечной энергии Сб.№1. – М.: Изд. АН СССР. – 1957. - с. 202-209.
11. Абуев И.М., Мышко Ю.Л., Смирнов С.И. и др. О техническом уровне солнечных коллекторов и перспективах его повышения в СССР //Монтажные и специальные работы в строительстве. 1989. № 4, - с. 8-9.
12. Смирнов С.И. Конструкции солнечных коллекторов /Системы солнечного тепло – и хладоснабжения: Под ред. Э.В.СарнацкогоиС.А.Чистовича. – М.: Стройиздат.1990. - с. 56-82.
13. Weiss W., Spörk-Dür M. Solar Heat Worldwide: Global Market Development and Trends in 2020. Detailed Market Figures 2019. 2021 Edition. - 86 pages Электронный ресурс:<https://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2021.pdf>

14. Умаров Г.Я., Трухов В.С., Газиев У.Х. и др. Теплоприемник солнечной энергии с селективным покрытием и вакуумной теплоизоляцией // Гелиотехника. 1978. №4.- с. 46-48.
15. Елисеев В.Б., Колтун М.М., Невежин О.А. и др. Преобразователь солнечного излучения в тепловую на основе коаксиальных вакуумированных трубчатых элементов с многослойными селективными покрытиями // Гелиотехника. 1978. №2, - с. 29-40.
16. Байматов Т., Газиев У.Х., Абидов Т.З. Исследования теплоприемника солнечной энергии // Гелиотехника. 1979. №3, - с. 37 - 40.
17. Аvezов Р.Р., Аvezова Н.Р., Вохидов А.У. Ресурсные показатели плоских солнечных водонагревательных коллекторов. Методика расчета основных теплотехнических, технико-экономических и экологических показателей солнечных коллекторов. // Монография. Изд-во «LAP-Lambert Academic Publishing» - Саарб-руккен, Германия, 2016 – 93 с.
18. Kalogirou S.A. Solar thermal collectors and applications // Elsevier B. V. Progress in Energy and Combustion Science. 2004. v. 30. №3. pp. 231-295.
19. Владимирова Л.Н., Граф Б.А. Исследование изменения технических характеристик солнечной установки типа «горячего ящика» при использовании селективных поверхностей. Доклады Всесоюзной конференции по использованию солнечной энергии (г. Ереван, 17-21 июля 1969 г). Секция С-4. Солнечные тепловые установки. –М.: ВНИИТ. 1969, - с. 153-168.
20. Аvezов Р.Р., Вохидов А.У., Рахимов Э.Ю., Куралов М.А. Моделирование процессов тепловых потерь в окружающую среду плоских солнечных водонагревательных коллекторов через светопрозрачные покрытия их корпусов // Гелиотехника. 2019. Том 55, № 4, - с. 343-352.
21. Аvezова Н.Р. Комплексная оптимизация параметров листотрубных лучепоглощающих теплообменных панелей плоских солнечных коллекторов для нагрева жидкого теплоносителя // Гелиотехника. 2011, №1, - с. 13-15.
22. Аvezов Р.Р., Абдухамидов Д.У. К определению коэффициента поглощения солнечного излучения в светопрозрачных покрытиях плоских гелиоустановок // Гелиотехника. 2015. №3, -с. 88-90.
23. Баум В.А. Технические характеристики солнечных водоопреснителей парникового типа // Теплоэнергетика. Вып.2. Использование солнечной энергии. -М.: Изд-во АН СССР. 1960, - с.122-132.
24. Аvezова Н.Р. Моделирование процессов теплового преобразования солнечной энергии в плоских коллекторах и оптимизация их основных

- параметров для использования в системах горячего водоснабжения. Автореф. дис. докт.тех.наук. –Ташкент: 2018. 68 с.
25. Аvezova Н.Р., Аvezov Р.Р., Воxидов А.У., Рахимова Э.Ю. Плоский солнечный коллектор: процессы теплового преобразования солнечной энергии и оптимизация их основных параметров для использования в системах горячего водоснабжения. // Монография. Изд-во «Voriz-Nashriyot» - Ташкент, Узбекистан, 2020. – 206 с.
 26. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. –М.: «Энергия», -1967, - 412 с.
 27. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. -М.: «Энергия». 1975.- 488 с.
 28. Михеев М.А. Основы теплопередачи. – М. Л.: Госэнергоиздат, 1956,- 392 с.
 29. Икбол М., Стахевич Д.В. Влияние ориентации трубы на теплопередачу при совместном действии свободной и вынужденной конвекции// Теплопередача (русский пер. Trans. ASME, Ser. C), 1966, №1, -С. 119-126.
 30. Гребер Г., Эрк С., Григуль У. Основы учения о теплообмене , под ред. А. А. Гухмана. – М.: ИИЛ, 1958г. 598 с.
 31. Avezov R.R., Avezova N.R., Rakhimov E.Yu., and Vokhidov A.U. Determination of the convective heat-exchange coefficient in inner channels of light-absorbing heat-exchange panels of flat-plate solar water-heating collectors based on the results of their short-term thermal testing in full-scale conditions, Applied Solar Energy, 2018, vol. 54, No. 1, pp. 10–16.
 32. Аvezov Р.Р., Рахимова Э.Ю., Куралов М.А. Расчет температуры внутренней поверхности стенки теплоотводящего канала лучепоглощающих теплообменных панелей плоских солнечных водонагревательных коллекторов // Гелиотехника. 2017. №2, - с. 24-29.
 33. Avezova N.R Procedure for determining the average heat-transfer temperature in heat removal channels of flat solar collectors and other thermal engineering parameters and complexes according to thermal testing results// Applied Solar Energy. 2015. V. 51. № 3. pp. 172-176.
 34. Avezova N.R., Avezov R.R. Dependence of the coefficient of environmental thermal losses of radiation-absorbing thermal exchange panels of flat solar collectors for heating heat-transfer fluid from their average operating and ambient temperatures // Applied Solar Energy. 2015. V. 51. № 1. pp. 10-14.
 35. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes., - New York: Wiley Interscience publication. 1991, -919 p.

36. Key findings of the Renewables 2020 Global Status Report – REN 21 – 2020. – 36 pages.
37. Андерсон Б. Солнечная энергия (Основы строительного проектирования). Пер. санг. – М.: Стройиздат. 1982, - 375 с.
38. Сибикин Ю.Д. Сибикин М.Ю. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии – М.: ИП РадиоСофт, 2008, - 338 с.
39. Системы солнечного тепло и хладоснабжения / Р.Р. Аvezов, М. Барский-Зорин, И.М Васильева и др. Под ред. Э.В. Сарнацкого и С.А. Чистовича. - М.: Стройиздат. 1990, 328 с.
40. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. - М.: Энергоатомиздат . 1991, - 208 с.
41. Бутузов В.А. Солнечное теплоснабжение: статистика мирового рынка и особенности российского опыта. - Теплоэнергетика, 2018, № 10, с. 78–88.
42. Германович В., Турилин А. Альтернативные источники энергии. Практические конструкции по использованию энергии ветра, Солнца, воды, земли, биомассы. – СПб.: Наука и Техника, 2011. – 320 с.
43. Рашидов Ю.К. Использование организационных гидротермических процессов в гелиосистемах теплохладоснабжения.– М., ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре. 1984 г. №1. 45 с.
44. Аvezова Н.Р., Рузиев О.С., Вахидов А.У., Куралов М.А. Зависимость удельной теплопроизводительности и тепловой эффективности плоских солнечных абсорберов от температуры нагрева жидкого теплоносителя в системах горячего водоснабжения//Қарши давлат университети “Муқобил энергия манбаларидан фойдаланишнинг долзарб муаммолари” Республика илмий-техник анжумани, 2014г. 28-29 апрель. с. 22-24.
45. Avezova N.R., Avezov R.R. No-contact method of determining average working-surface temperature of plate-type radiation-absorbing thermal exchange panels of flat solar collectors for heating heat-transfer fluid// Applied Solar Energy. 2015. V. 51. № 2. pp. 85-87.
46. Avezova N.R. Heat transfer coefficient from light-absorbing heat exchanging panel to the heat transfer in flat-plate solar collectors and absorbers for heating of the heat transfer fluid, Int. J. Eng. Adv. Res. Technol. (India), 2016, vol. 2, no. 10, pp. 39–40.

47. Kalogirou S.A. Solar Energy Engineering, Amsterdam: Elsevier, 2009. – 850 p.
48. Buonomano A., Forzano C., Kalogirou S.A., and Palombo A. Building-facade integrated solar thermal collectors: energy-economic performance and indoor comfort simulation model of a water based prototype for heating, cooling, and DHW production, Renewable Energy, 2018. - p.17.
49. Sorensen B. Renewable Energy. Physics, Engineering, Environmental Impacts, Economics and Planning, Amsterdam: Elsevier, 2017. – 1030 p.
50. Solar Heat Worldwide: Solar Heating and Cooling Programme, Int. Energy Agency, 2016. – 74 p.
51. Avezov R.R., Rakhimov E.Yu., and Mirzabaev A.M. Calculation of the temperature of the internal surface of the heat-removing channel wall of the ray-absorbing heat-exchange panels of flat-plate solar water-heating collectors, Applied Solar Energy, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 312–315.
52. Duffie J.A. and Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes, New York: Wiley, 2013. – 888 p.
53. McAdams W.H. Heat Transmission 3rd ed. McGraw-Hill, New York. 1954 – 532 p.
54. Sparrow E.M., Ramsey J.M., Mass E.A. Effect of Finite Width on Heat Transfer and Fluid Flow about an Inclined Rectangular Plate // Trans. ASME J. Heat Transfer. V. 101, 1979, - p.2.
55. Churchill S.W., Chu H.H.S. Correlation Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate // IJHMT, 1975. V.18, № 11, - pp. 1323-1329.
56. Fujii I., Imura H. Natural-Convection Heat Transfer from a plate with Arbitrary Inclination // IJHMT, 1972. V. 15, № 4, - pp. 755-767.
57. Berdahl P., Martin M. Emissivity of clear skies // Solar Energy. 1984. V. 32, № 5, - pp. 663-664. [[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90144-0)].
58. Исаходжаев Х.С., Усмонов Н.О. Энергосберегающий режим эксплуатации оборудования систем кондиционирования воздуха. // Сборник статей по материалам XV международной научно-практической конференции «Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке». – Новосибирск, март 2018г. – с. 40-45.
59. Hollands K. G. T., Unny T. E., Raithby G. D., Konicek L. Free Convection Heat Transfer Across Inclined Air Layers // Trans. ASME J. Heat Transfer. 1976, V. 98, № 2 –pp.43-49.

60. Бутузов В.А., Бутузов В.В. Использование солнечной энергии для производства тепловой энергии: Справочно-методическое издание/ Под редакцией П.П. Безруких. – М.: «Интехэнерго-Издат», «Теплоэнергетик», 2015. – 304.
61. Weiss W., Spörk-Dür M. Solar Heat Worldwide: Global Market Development and Trends in 2018. Detailed Market Figures 2017. 2019 Edition. - 86 p. Электронный ресурс:<https://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2019.pdf>
62. Вейнберг В.Б. Оптика в установках для использования солнечной энергии. –М.: Оборонгиз. 1959. 224 с.
63. Wang N., Zeng Sh., Zhou M., et al. Numerical study of flat plate solar collector with novel heat collecting components // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2015. V. 69. pp. 18–22.
64. Митина И.В. Повышение эффективности солнечных коллекторов с вакуумированными стеклопакетами. Автореф. дис. канд. тех. наук. - М.: 2009. 26 с.
65. Zambolin E., Del Col D. Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions // Solar Energy. 2010. V. 84. pp. 1382–1396.
66. Klein S.A. The effects of Thermal Capacitance Upon the Performance of Flat-Plate Solar Collectors // Master Thesis. University of Wisconsin, 1973.
67. Аvezова Н.Р. Моделирование процессов теплового преобразования солнечной энергии в плоских коллекторах и оптимизация их основных параметров для использования в системах горячего водоснабжения. Автореф. дис. докт.тех.наук. –Ташкент: 2018. 68 с.
68. Аvezов Р.Р., Рахимов Э.Ю., Вохидов А.У. Программа для расчета зависимости коэффициента тепловых потерь лучепоглощающих теплообменных панелей плоских солнечных коллекторов через светопрозрачные покрытия в окружающую среду от их степени черноты / DGU №05627, зарегистрированный в государственном реестре программ для ЭВМ Республики Узбекистан в г. Ташкенте, 16.08.2018.
69. Avezov R.R., Avezova N.R., Vokhidov A.U., Rakhimov E.Yu., Usmonov N.O. Influence of Meteorological Factors on the Thermal Loss Coefficient of Light-Absorbing Heat Exchange Panels of Flat-Plate Solar Water Heating Collectors through Transparent Coatings of Their Casings // Applied Solar Energy. 2018. v. 54. № 6. pp. 406–412.

70. Аvezов Р.Р., Воxидов А.У., Рахимоx Э.Ю. Влияние излучательной способности зачерненной поверхности лучепоглощающей панели плоских солнечных коллекторов на коэффициент теплообмена в замкнутой воздушной прослойке их корпусов// Гелиотехника 2018. № 5. – с. 73-75.
71. Avezova N.R., Avezov R.R., Vokhidov A.U., Rakhimov E.Yu., Gaziev U.Kh. Influence of Ambient Temperature, Wind Speed, Emissivity, and Average Working Temperature of Light-Absorbing Heat-Exchange Panels of Flat-Plate Solar Water-Heating Collectors on Their Thermal Losses Through Translucent Coatings // Appl. Sol. Energy. 2019. v. 55. No. 1. pp. 30–35.
72. Ciocănea A., Buretea D. L. The influence of flow tube vibrations over the efficiency of solar water heating collectors // Energy Procedia. 2017. V. 112 pp. 330 – 335.
73. Osório T., Carvalho M.J. Testing of solar thermal collectors under transient conditions // SHC 2012. Energy Procedia. 2012. V. 30. – pp. 1344 – 1353.
74. Klein S.A. Calculation of flat-plate collector loss coefficients. Journal of Solar Energy. 1975. V. 17. № 1. – pp. 79-80.
75. Luo B., Hu Zh., Hong X., He W. Experimental study of the water heating performance of a novel tile shaped dual-function solar collector // Energy Procedia. 2015. V. 70. – pp. 87 – 94.
76. Доклад о глобальном состоянии возобновляемой энергетики 2018. Основные результаты. // REN21. 2018 г. – 52 с.
77. Аvezов Р.Р., Аvezова Н.Р., Рахимоx Э.Ю. “Тепловая модель плоского солнечного водонагревательного коллектора”, Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» 2018. № 23-24, с. 12-20.
78. Avezov R.R., Avezova N.R., Ruziev O.S., Suleimanov Sh.I., Vakhidov A., “Longevity characteristics of flat solar water-heating collectors in hot water supply systems. Part 1. Procedure for calculating collector heating efficiency”, Appl. Sol. Energy, Vol.49, № 1, pp. 7-15, 2013.
79. Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. Л.: Энергия, 1971. – 296 с.
80. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.
81. Вилемас Ю.В., Воронин Г.И., Дзюбенко Б.В. и др. Интенсификация теплообмена: Успехи теплопередачи. 2. Под ред. проф. Жукаускаса А.А. и проф. Калинина Э.К. Вильнюс: Мокслас, 1988. 188 с.

82. Михеев М.А., Михеева И.М. Краткий курс теплопередачи. Учебник для неэнергетических специальностей ВТУЗ.–М. – Л.: Госэнергоиздат, 1961. - 208 с.
83. Петровский Ю.В., Фастовский В.Г. Современные эффективные теплообменники.– М. – Л.: Госэнергоиздат, 1962. - 257 с.
84. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. –Л.: Энергоатомиздат, 1981. 144 с.
85. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.
86. Бабаходжаев Р.П. Методы повышения энергоэффективности теплоэнергетических установок на основе интенсификации гидродинамических процессов.: Автореф. дис. док. техн. наук. – Т.: ТашГТУ. 2018 г. – 56 с.
87. Попов И.А., Щелчков А.В., Яркаев М.З. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление каналов со сферическими выступами. // Теплофизика высоких температур. – 2016, т. 54, №6 – с.894-903.
88. Гиниятуллин А.А., Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б. Теплоотдача при течении воды в трубках с оребренными скрученными ленточными вставками // ТВТ. 2018, т. 56, №2 – с. 313-316.
89. Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Гиниятуллин А.А., Шишкин А.В. Особенности гидравлических характеристик потока в канале с оребренными скрученными лентами. // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики “АНТЭ-2011”: материалы VI Международной научно-технической конференции. – Казань, 2011. – т.2. – с.630-635.
90. Гиниятуллин А.А. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление со вставками в виде оребренных скрученных лент. : Автореф. дис. канд. техн. наук. – К.: КНИТУ. 2015 г. – 16 с.
91. Лаптев А.Г., Николаев Н.А., Башаров М.М. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов. Учебно-справочное пособие. – М.: Теплотехник, 2011. – 335 с.
92. Гортышев Ю.Ф., Олимпиев В.В., Байгалиев Б.Е. Теплогидравлический расчет и проектирование оборудования с интенсифицированным теплообменом. - Казань: Изд-воКГТУ, 2004. – 432 с.
93. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. - Л.: Энергия, 1980. 144 с.

94. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник. – М.: Издательство МЭИ. 1999. – 168 с.
95. Бутузов В.А. Солнечное теплоснабжение: статистика мирового рынка и особенности российского опыта. // Теплоэнергетика. 2018. № 10. – с. 78-88.
96. Да Роза А. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы. М.: «Интеллект» МЭИ, 2010 – 704 с.
97. Avezov R.R., Abdukhamidov D.U. On determining the solar radiation absorption factor for translucent coatings of flat solar plants // Appl. Sol. Energy. 2015. V. 51. pp. 232–234.
98. Альшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости). - М., Стройиздат. 1975.- 323 с.
99. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. - М., - Л.: Государственное энергетическое издательство. 1960. 464 с.
100. Авезова Н.Р., Авезов Р., Вохидов А.У., Куралов М.А., Хаитмухамедов А.Э., Усманов А.Ю., Рахимов Э.Ю. Коллекторы солнечные. Методы испытаний. – Ўзбекистон Республикаси Давлат стандарти. O'z DSt ISO 9806: 2020(ISO 9806:2017, MOD). – 51 с.
101. Патент KZ №1584 F24J 2/00 (2006.01) от 29.07.2016 г., Байсеитов Д.М., Тыныштыкбаев К.Б. Листотрубная теплоприемная панель гелиоколлектора.
102. Gillett W.B., Moon J.E. Solar collectors. Test methods and design guidelines. Solar Energy R&D in the European Community. Series A. Volume 6. 1995. D. Reidel Publishing Company. Boston, p.41.
103. Gillett W.B., Moon J.E. Solar collectors. Test methods and design guidelines. Solar Energy R&D in the European Community. Series A. Volume 6. 1995. D. Reidel Publishing Company. Boston, p.40.
104. Патент RU №53416. F24J2/24, F24J2/48. от 10.05.2006 г. «Теплогидравлический испытательный стенд». Попель О.С., Прокопченко И. В., Сулейманов М.Ж., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г.
105. Абдухамидов Д.У., Вохидов А.У., Рашидов К.Ю., Усмонов А.Ю. Повышение коэффициента тепловой эффективности теплоприемных панелей для солнечных коллекторов. // Проблемы энерго и ресурсосбережения, 2021, № 2. – с. 174-187.
106. Патент KZ №1584 F24J 2/00 (2006.01) от 29.07.2016 г., Байсеитов Д.М., Тыныштыкбаев К.Б. Листотрубная теплоприемная панель гелиоколлектора.

107. Патент KZ №1583F24J 2/00 (2006.01) от 29.07.2016 г., Байсеитов Д.М., Тыныштыкбаев К.Б. Листотрубная теплоприемная панель гелиоколлектора.
108. Патент KZ №1610F24J 2/00 (2006.01) от 15.08.2016 г., Байсеитов Д.М., Тыныштыкбаев К.Б. Способ изготовления листотрубной теплоприемной панели гелиоколлектора.
109. Патент UZ №FAP 01490F24S10/75 (2018.01) от 17.03.2020 г., Авезов Р.Р., Рашидов Ю.К., Рашидов К.Ю.«Плоская лучепоглощающая теплообменная панель».
110. Патент UZ № FAP 01472 F24S10/75 (2018.01) от 15.01.2020 г., Авезов Р.Р., Авезова Н.Р., Рашидов Ю.К., Абдухамидов Д.У., Рашидов К.Ю. «Листотрубная теплоприемная панель гелиоколлектора».
111. Патент UZ № FAP 01563 F24S10/75 (2018.01) от 28.11.2020 г., Авезов Р.Р., Авезова Н.Р., Рашидов Ю.К., Абдухамидов Д.У., Самиев К.А., Рашидов К.Ю. «Листотрубная теплоприемная панель гелиоколлектора».
112. Электронный ресурс: <http://www.standart.uz/ru/page/view?id=26>
113. Вохидов А.У., Авезов Р.Р., Куралов М.А. Солнечная энергетика. Термины и определения. – Ўзбекистон Республикаси Давлат стандарти. О'zDSt 3210:2017. – Утвержден и введен постановлением Агентства «Узстандарт» за № 05-879 от 07.09.2017 г. – 25 с.
114. Авезова Н.Р., Авезов Р.Р., Вохидов А.У., Куралов М.А. Системы фотоэлектрические автономные. Контроль работоспособности. – Ўзбекистон Республикаси Давлат стандарти. О'z DSt 3182: 2017. – 45 с.
115. Авезова Н.Р., Авезов Р., Вохидов А.У., Куралов М.А., Хаитмухамедов А.Э., Усманов А.Ю., Рахимов Э.Ю. Коллекторы солнечные. Методы испытаний. – Ўзбекистон Республикаси Давлат стандарти. О'z DSt ISO 9806: 2020(ISO 9806:2017, MOD). – 51 с.
116. Вохидов А.У., Авезов Р., Рашидов Ю.К., Куралов М.А. Коллекторы солнечные плоские. Общие технические условия. – Ўзбекистон Республикаси Давлат стандарти. О'zDSt 3504:2020. – 45 с.
117. Калашян М.С., Попель О.С., Шрильрайн Э.Э. Экспериментальный жилой дом с системой солнечного теплоснабжения в поселке Мерцаван Армянской ССР // Гелиотехника, 1986. №3. – с. 66-71.
118. Патент на полезную модель № FAP 01052 от 24.07.2014. «Солнечно - топливная система горячего водоснабжения». Авторы: Авезова Н.Р., Бугаков А.Г., Вохидов А.У.// Официальный бюллетень. Агентство по интеллектуальной собственности РУз.№ 12. 2015. – с. 71-72.

ISBN 978-991089889-1

